

纯电动客车的双轴电机驱动扭矩分配策略

孙 炜, 欧阳智, 郑志敏, 刘逸群

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要:以某纯电动客车为对象,提出一种双轴电机驱动扭矩控制策略。通过 AVL Cruise 和 Simulink 的联合仿真模型进行整车动力性与经济性仿真。结果表明,该策略能在保证整车动力性的同时提高经济性。

关键词:纯电动客车; 双轴电机; 驱动扭矩; 动力性; 经济性

中图分类号:U469.72; U461.2

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2022)06-0014-04

Distribution Strategy of Dual-axis Motor Drive Torque for Pure Electric Buses

SUN Wei, OUYANG Zhi, ZHENG Zhimin, LIU Yiqun

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Taking a pure electric bus as the object, this paper proposes a control strategy of dual-axis motor drive torque and simulates the bus power and economy through the co-simulation model with AVL Cruise and Simulink. The results show that the strategy can improve the economy and keep the bus power.

Key words: pure electric bus; dual-axis motor; drive torque; power; economy

对于 12 m 及以上的大型纯电动客车而言,单电机单轴驱动系统由于底盘结构与电机能力限制,在坡道起步、加速超车、地面湿滑等工况下无法正常满足驾驶员与整车的驱动需求,而双轴驱动电动汽车的驱动系统通过驱动扭矩分配策略^[1-4],实现前后两个电机匹配协调工作,有着良好的性能优势^[5-7]。

本文提出一种针对大型纯电动客车的双轴双电机驱动扭矩分配策略,该策略基于电机外特性,实时根据整车车况、驾驶员需求等输入进行双电机的驱动扭矩分配,在满足整车动力性的基础上提高经济性,为电动汽车研发提供参考。

1 动力系统与控制

1.1 动力系统选型及架构

本文研究的 18 m 铰接纯电动客车从两个方面进行动力系统选型:

1) 驱动形式。大体上可分为带有多挡变速器的电机直驱、仅有主减速器的电机直驱和轮边/轮毂电

机驱动。轮边/轮毂电机驱动需要对电机进行精准差速控制,在纯电动大客车上难以达到理想的效果;带多挡变速器的电机直驱,有着复杂的传动结构,会增加成本并降低可靠性;而仅有主减速器的电机直驱结构能够通过多电机性能匹配来满足整车动力性与经济性需求,并且成本较低,更容易进行精准控制。所以本文选择仅有主减速器的电机直驱结构。

2) 多电机性能匹配。可以分为相同型号电机与不同型号电机的组合。相比于相同型号电机的组合,采用不同型号电机的组合可以根据电机的驱动效率图进行更精细的匹配,在满足动力性需求的前提下,有望达到更低的能耗。本文基于前期性能与成本评估,选择了前后轴不同型号的电机组合方案:前轴作为主驱动轴,布置型号为 MD2021、额定功率为 165 kW 的大功率双绕组直驱电机;后轴作为动力增强轴,布置型号为 MD2007、额定功率为 70 kW 的单绕组直驱电机。

本文研究的 18 m 铰接纯电动客车动力系统架构

收稿日期:2022-06-15。

第一作者:孙 炜(1995—),男,助理工程师;主要从事整车控制相关研究工作。E-mail:750183947@qq.com。

如图1所示。其中:整车控制器(VCU)通过采集电机控制器(MCU)、电池管理系统(BMS)等的信息以及驾驶员意图,采取相应的策略控制整车动力系统;BMS管理高压动力电池包,以并联方式分两路给前电机MCU与后电机MCU供电;动力电池电能在前、后电机控制器的调制下转换为三相交流电,给前后驱动电机提供能量。

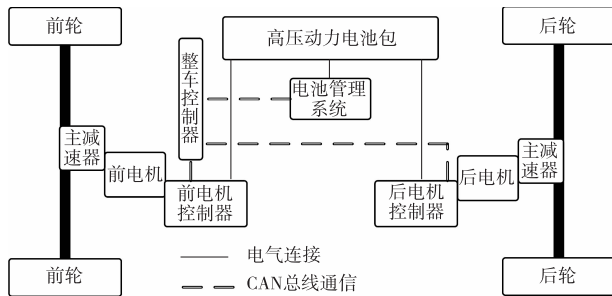


图1 18 m 铰接纯电动客车动力系统架构

1.2 整车控制结构

根据图1所示的整车动力系统架构设计的整车控制结构如图2所示,其中:

1) 信号输入模块。包括相关信号输入组成的CAN信号输入通道^[8-9]、开关量输入通道、模拟量输入通道。信号输入模块为整车控制各功能模块提供逻辑输入。

2) 信号处理模块。CAN信号输入在该模块进行报文滤波与解析;开关量信号输入根据需求在该模块进行有效性滤波;模拟量信号输入在该模块转化为对应的数字量信号。信号处理完成后进行整合,输出到后续整车功能模块。

3) 整车上下电管理模块。该模块接收BMS与前后MCU的高压接触器状态、高低压上下电等输入信号,控制BMS与前后MCU的高压接触器的闭合与断开,进行整车高低压管理。

4) 驾驶意图解析模块。该模块采集挡位开关、加速踏板与制动踏板开度等输入信号,解析出驾驶意图,为相关部件提供控制依据。

5) 双电机扭矩控制模块。该模块采集前后MCU电流、电机转速等状态信号计算当前动力系统能力,再根据获取的驾驶意图以及整车工况,计算出当前目标扭矩并进行分配,最后通过CAN报文分别

控制前后电机扭矩输出。

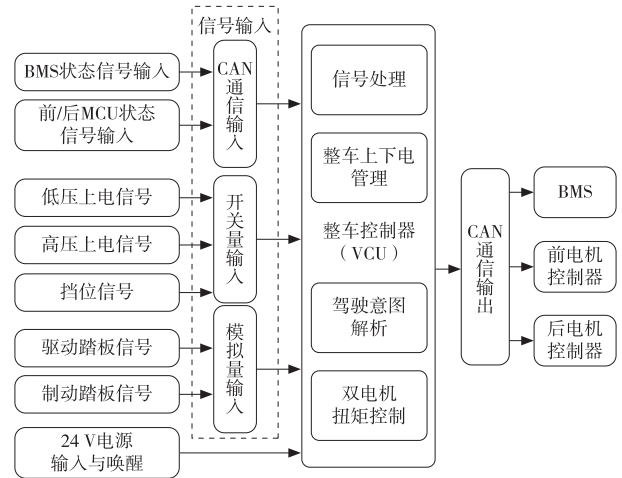


图2 整车控制结构图

1.3 驱动扭矩控制

1.3.1 双轴电机驱动工作模式

考虑到前后电机的外特性曲线以及整车动力性需求,本文的双电机驱动系统有三种工作模式:

1) 在低速超车、坡道起步等低速驱动扭矩需求大的工况下,前后双电机均需输出驱动扭矩共同驱动。

2) 当车速适中时,前电机作为大功率主驱电机,单独驱动即可满足整车动力需求,且电机工作在高效区,提高了整车经济性。

3) 当在高速行驶的状态下有加速需求时,前后双电机均需输出驱动扭矩共同驱动,以保证整车动力性。

1.3.2 双轴电机驱动峰值总扭矩计算

根据上述工作模式,计算当前转速下的双电机驱动峰值总扭矩 T_m ,可表示为

$$T_m = \begin{cases} T_{fp} + T_{tp}, & 0 < n < n_{fs} \\ T_{fp}, & n_{fs} < n < n_{fr} \\ 9\,950 \cdot (P_{fp} + P_{tp}) / n, & n_{fr} < n \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_{fp} 、 T_{tp} 分别为前、后轴电机峰值扭矩; n_{fs} 为前轴电机独立工作的电机转速阈值(小于后轴电机的额定转速 n_r); n_{fr} 为前轴电机的额定转速; P_{fp} 、 P_{tp} 分别为前、后轴电机峰值功率。

1.3.3 双轴电机需求总扭矩计算

整车驱动驾驶意图的直接体现为加速踏板开度的变化。不同电机转速下,双电机需求驱动总扭矩 T_n 可以表示为

$$T_n = T_m \cdot D \quad (2)$$

式中: T_m 为式(1)计算出的双电机驱动峰值扭矩; D 为加速踏板开度。

式(2)能够在驱动系统能力足够的情况下实时响应驱动意图。

1.3.4 双轴电机驱动扭矩分配策略模型

在不考虑传动轴机械损耗以及电机空载损耗的情况下,根据前后轴电机同时工作或单独工作来计算相应的双电机驱动输入功率 P_n 与实际输出功率 P_r :

$$P_n = \begin{cases} P_{fo}/\eta_f + P_{ro}/\eta_r, P_{fo} \neq 0, P_{ro} \neq 0 \\ P_{fo}/\eta_f, P_{ro} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$P_r = \begin{cases} P_{fo} + P_{ro}, P_{fo} \neq 0, P_{ro} \neq 0 \\ P_{fo}, P_{ro} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{fo} 、 P_{ro} 分别表示前、后轴电机输出功率; η_f 、 η_r 分别表示前、后轴电机效率。

双电机驱动系统总体效率 η_d 的计算公式为

$$\eta_d = P_r / P_n \quad (5)$$

电机驱动系统功率 P 与扭矩 T 、电机转速 n 的关系为

$$P = nT/9\,550 \quad (6)$$

将式(3)、(4)、(6)代入式(5)可将双电机驱动系统的总体效率 η_d 表示为

$$\eta_d = \begin{cases} \frac{[n_f \mu + n_r (1-\mu)] \eta_f \eta_r}{\eta_f n_f \mu + \eta_r n_r (1-\mu)}, 0 < \mu < 1 \\ \eta_f, \mu = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ 为前轴电机驱动扭矩占双电机驱动总扭矩的分配系数; n_f 、 n_r 分别为前、后轴电机实时转速。

式(7)为双电机驱动系统的总体效率 η_d 与双电机驱动扭矩分配系数 μ 的函数模型。

本文前轴电机与后轴电机属于直驱电机,且主减速比都为 6.2,因此 $n_f = n_r$,简化式(7)可得:

$$\eta_d = \begin{cases} \eta_f \eta_r / [\eta_r \mu + \eta_f (1-\mu)], 0 < \mu < 1 \\ \eta_f, \mu = 1 \end{cases} \quad (8)$$

综合式(1)~(8)可以得到本文的双电机驱动扭矩分配策略模型为

$$\begin{cases} T_n = T_m \cdot D, \mu = f \cdot \eta_{dm} \\ T_{fn} = T_n \cdot \mu, T_{rn} = T_n \cdot (1-\mu) \end{cases} \quad (9)$$

式中: η_{dm} 为双电机总体效率 η_d 的最大值; T_{fn} 、 T_{rn} 为

双电机总体效率最高情况下分别分配给前、后轴电机的驱动扭矩。

2 仿真分析

2.1 仿真模型建立

按以下步骤建立仿真模型:

1) 将双轴电机驱动扭矩分配策略封装成 Simulink 功能模块,整合到 Simulink 双电机控制模型中,并向 AVL Cruise 开放模型所需的输入与输出接口。

2) 运用 AVL Cruise 建立整车仿真模型^[10-11],并在模型中导入整车、电机、电池参数,再分别运行 AVL Cruise 任务界面中的最大能力加速工况和中国典型城市公交循环工况^[12](CCBC)的能耗仿真任务。两个仿真任务车速变化快、变化范围广,能够充分切换双电机扭矩工作模式,验证双电机驱动扭矩分配策略的效果。

3) 将 AVL Cruise 仿真分析运行时的各个参数、加速踏板开度、电机转速等作为上述 1) 中所述的 Simulink 双电机控制模型输入,然后 Simulink 模型分别计算出前后电机驱动目标扭矩并输出给 AVL Cruise 整车仿真模型,完成联合仿真。整体架构如图 3 所示。

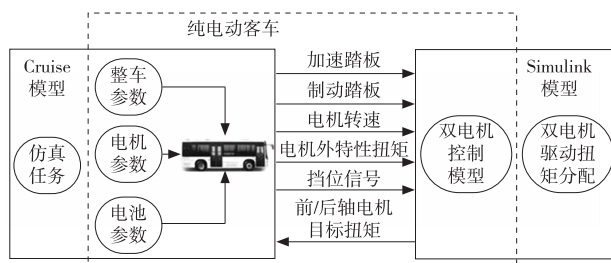


图3 联合仿真模型架构

2.2 仿真分析

传统的双电机平分驱动扭矩策略(下文表示为策略2)是指在全工况下整车驱动扭矩都会平分给前后电机,该策略实现简单且通用性强,但无法使电机灵活工作在高效率区。本文基于 1.3 节中的双电机效率的驱动扭矩分配策略(下文表示为策略1)与策略2分别进行整车动力性与经济性仿真分析:

1) 0~50 km/h 的加速时间。在上述联合仿真模型中运行最大能力加速任务,加速踏板开度在 1 s 内

以线性增长方式达到最大值并保持,直到车速上升至 50 km/h 时,仿真任务结束。由仿真结果可知:两种策略加速时间都在 9 s 左右,且最大爬坡度都能达到 24.8%,无明显差异。

其中,在策略 1 的情况下,整车起步时的驱动需求总扭矩较大,当车速低于前电机独立工作的车速阈值(30.4 km/h)时,双电机驱动工作模式进入模式 1,前后双电机基于双电机工作总效率最大原则实时分配驱动扭矩并输出;当车速达到前电机独立工作的车速阈值时,双电机驱动工作模式进入模式 2,此时前电机单独工作效率更高,双电机同时工作切换为前电机单独工作,切换时整车加速略微受到影响;当车速达到前轴电机的额定转速(43.5 km/h)时,此时整车处于高速加速状态,双电机驱动模式进入模式 3,前后双电机基于双电机工作总效率最大原则实时分配驱动扭矩并输出。

另外,由理论分析可知,在起步爬坡性能方面,由于策略 1 与策略 2 的驱动需求总扭矩相等,且此阶段策略 1 的工作模式一直为第一种,没有进行模式切换,与策略 2 同属于双电机共同驱动,区别在于双电机的扭矩分配系数不同,所以策略 1 与策略 2 在起步爬坡性能上无明显差异,故没有必要单独进行联合仿真分析。

总体而言,策略 1 与策略 2 在整车动力性上无明显差异。

2) 将 CCBC 循环工况路谱导入到上述联合仿真模型^[13],运行 CCBC 循环工况能耗仿真任务。仿真结果见表 1。

表 1 CCBC 循环工况能耗仿真结果

	行驶里程/ km	能耗/ kW·h	百公里能耗/ (kW·h·100 km ⁻¹)	续驶里程/ km
策略 1	11.600	13.25	118.7	426
策略 2	11.600	13.96	120.3	420

从表 1 可知:在 CCBC 循环工况下,本文提出的策略 1 是基于双电机效率进行驱动扭矩分配,相较于传统的策略 2,策略 1 能有效减少整车能耗。

3 结 论

本文提出一种针对大型纯电动客车的双轴双电

机驱动扭矩分配策略,该策略能够基于双电机工作效率,结合整车工况、驾驶员意图等进行双轴电机驱动扭矩分配;并通过 AVL Cruise-Simulink 联合仿真进行整车动力性与经济性仿真。结果表明,本文的双轴双电机驱动扭矩分配策略在满足车辆整车动力性的基础上能提高经济性,符合设计预期。

参考文献:

- [1] 熊会元,何山,查鸿山,等. 双轴驱动纯电动汽车驱动转矩的分配控制策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018,46(11):117-124.
- [2] 李军伟,宋振斌,孙宾宾,等. 双电机双轴驱动电动汽车控制系统开发[J]. 机械设计与制造,2021,365(7):86-88.
- [3] 宋振斌,李军伟,孙宾宾,等. 基于模型的双电机驱动电动汽车控制系统开发[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2020,34(2):31-36.
- [4] 李胜琴,汤亚平. 基于效率最优的双电机四驱汽车转矩分配策略研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2019,33(7):12-20.
- [5] ZHANG Chengning, ZHANG Shuo, HAN Guangwen, et al. Power management comparison for a dual-motor-propulsion system used in a battery electric bus[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(5):3873-3882.
- [6] 喻厚宇,黄妙华,邓楚南. 双电机双轴驱动纯电动车控制策略的研究[J]. 北京汽车,2007(4):12-15.
- [7] ZHANG Shou, XIONG Rui, ZHANG Chengning, et al. An optimal structure selection and parameter design approach for a dual-motor-driven system used in an electric bus[J]. Energy,2016(96):437-448.
- [8] 饶运涛,邹继军,郑勇芸. 现场总线 CAN 原理与应用技术[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2003(6):11.
- [9] 高松,高燕. 浅谈 J1939 协议在客车 CAN 总线中的应用[J]. 农业装备与车辆工程,2005(10):29-31.
- [10] 余志生. 汽车理论:第 5 版[M]. 北京:机械工业出版社,2009:41-43.
- [11] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学:第 6 版[M]. 北京:高等教育出版社,2002:264-265.
- [12] 姚学松,杭孟荀,沙文瀚. 电动汽车双电机驱动系统扭矩分配策略研究[J]. 电子产品世界,2020,27(11):45-50.
- [13] 章印,王戡喧,吴鹰,等. 基于 Cruise 的某纯电动商用车动力系统参数匹配及仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(3):121-124.