

纯电动客车双电机耦合驱动系统控制策略研究^①武小花^② 阴晓峰

(西华大学汽车工程研究所 成都 610039)

摘 要 研究了一种实际双电机耦合驱动纯电动客车的综合控制。根据双电机行星耦合驱动系统的结构与工作原理,将系统分为低速单电机模式与高速双电机模式,制定了对应不同工作模式及模式切换过程的控制策略,设计了控制器系统及控制流程,并进行了仿真验证。仿真结果表明,该双电机耦合驱动系统控制器能有效实现对双电机动力的控制,在满足驾驶员需求转矩的前提下,提高了系统的综合效率。

关键词 双电机,耦合驱动,控制策略,电动汽车

0 引 言

多动力耦合驱动系统能够协调各个动力源的工作特性,优化各动力源的工作区域,将驱动系统的总体效率和驱动特性最优化,从而提高电动汽车的各项性能指标。多动力耦合系统具有更大的节能潜力和更好的发展前景,其核心和实质是在满足电动汽车性能要求的前提下,将不同动力源的输出动力进行合理、高效的合成与分解,达到系统效能最优^[1-4]。作为多动力耦合驱动汽车的关键技术之一,多能源综合控制系统担负着信号采集、驾驶员意图识别、能量分配和控制命令输出等重要功能,是实现整车控制策略的核心部件,其性能优劣直接影响着车辆的经济性和动力性^[5]。一般根据驾驶员操作和车辆状态等信息,决定合适的车辆工作模式(单动力源模式、多动力源耦合模式等),再在该模式下对系统各部件进行功率分配^[6-9]。本文研究了双电机行星耦合驱动的纯电动客车的综合控制策略,并设计了控制系统和控制流程。该电动客车具有动力通过简单行星齿轮组耦合后由行星架输出的特殊结构。本文介绍了该车动力综合控制系统的软硬件开发,提出了基于效率最优的动力分配策略,并在模式切换过程中引入不同动力间的协调控制以提高车辆的动力性和舒适性。仿真结果表明,该综合控制系统能

有效地实现对双电机动力的控制,使车辆经济性与动力性达到了较好的统一。

1 系统结构及工作原理

本文所研究的是 18 吨纯电动客车的双电机行星耦合驱动系统,其结构简图如图 1 所示。该耦合驱动系统由一组简单行星齿轮机构、两台永磁同步电机(电机 1 与电机 2)、一个制动器 B 组成。行星机构的太阳轮与电机 1 转子直接连接;齿圈的一端与电机 2 的转子直接连接,另一端与制动器 B 的可动部分相连,制动器 B 的固定部分与箱体固连;行星架通过万向节传动轴与主减速器相连,输出动力。

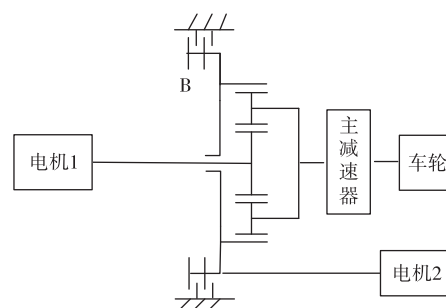


图 1 双电机行星耦合驱动系统结构简图

在低速时,制动器 B 接合,齿圈锁止,电机 1 的动力通过太阳轮输入,行星架输出,实现大变比减速

① 国家自然科学基金(51175040),四川省科技厅应用基础项目(2013JY0088),2012 四川省教育厅项目(12ZB320),北京理工大学电动汽车国家工程实验室开放基金(2012-NELEV-03)资助项目。

② 女,1984 年生,博士;研究方向:电动汽车整车控制及多动力耦合技术;联系人,E-mail:xiaohuawu13@163.com (收稿日期:2012-12-05)

后大扭矩输出,满足车辆低速爬坡和加速大扭矩的需求;在高速时,制动器 B 脱开,齿圈解锁,电机 2 与电机 1 通过行星机构实现转速耦合,共同驱动车辆;在车辆由低速模式切换到高速模式的过程中,电机 1 一直处于驱动状态,电机 2 通过零速转矩调节可使齿圈所受合力矩较小,方便制动器 B 解除,制动器 B 解除后电机 2 转为驱动状态,实现高速两台电机转速耦合;在车辆由高速模式切换到低速模式的过程中,电机 2 通过再生制动迅速将齿圈转速减小至 0,方便制动器 B 将齿圈锁止,齿圈锁止后电机 2 处于关闭状态。在整个模式切换过程中,充分利用电机 2 的调节实现柔性模式切换,制动器与齿圈没有速度差,冲击小。双电机行星耦合驱动系统属于多能源动力系统的范畴,电机 1 与电机 2 既可作为机械动力源驱动车辆,也可作为电动力源在制动时作为发电机运行。虽然电机 2 在低速没有参与工作,但通过电机与行星传动特征参数的匹配完全满足车辆牵引特性需求。

2 控制策略分析

双电机行星耦合驱动系统功能实现的基础是对驱动电机的控制调节。驱动电机的控制分为转矩控制与转速控制,目前电动汽车最广泛采用的是转矩控制。调节转矩的动力学控制策略的主要任务是对驾驶员操作进行合理的定义与解释,与电机 1、电机 2 目标转矩输出合理匹配,实现整车的正常行驶。与调节转速的控制策略不同,调节转矩的控制策略完全不受外界环境的影响(比如各种阻力),驾驶员操作控制的是电机 1 与电机 2 的输出转矩,至于克服阻力后的速度情况,则全部交由驾驶员进行判别和处理。本文选用对双电机转矩调节的控制方式。

2.1 工作模式的确定

确定工作模式是整车控制策略的核心之一,目的是根据车辆当前状态(车速、运行模式、踏板强度等)将驾驶员的需求转矩合理地分配给电机 1 和电机 2,使整车达到较好的经济性和动力性。根据电机 1、电机 2 和制动器的工作状态,本文定义了车辆工作的 5 种工作模式,具体如表 1 所示。当车辆行驶车速较小时,车辆工作于低速单电机模式下,电机 2 不直接参与驱动。随着车辆行驶车速的增加,车辆的动力改由电机 1 与电机 2 提供,此时耦合箱的输出功率包含电机 1 功率和电机 2 功率两部分。

表 1 车辆工作模式

工作模式	动力源工作状态		制动器	车辆
	电机 1	电机 2	B	状态
空挡模式	关闭	关闭	脱开	停车
低速单电机驱动	驱动	关闭	接合	起步、爬坡
高速双电机耦合驱动	驱动	驱动	脱开	高速
低速单电机再生制动	发电	关闭	接合	制动
高速双电机联合再生制动	发电	发电	脱开	制动

2.2 需求转矩的确定

2.2.1 低速单电机模式

在低速单电机模式下,综合控制单元把驾驶员的意图(包括加速踏板、制动踏板)最终解释为电机 1 的目标输出转矩,并实时向电机 1 发送该转矩指令。电机 1 自主进行转矩调节以保证实际输出转矩与目标转矩指令相同。在此低速模式下,耦合箱相当于一个具有大减速比的减速箱,当电机 1 达到最高转速时,车辆达到单电机工作模式的最高车速。

电机 1 的目标力矩 $T_1^*(s)$ 可以表示为

$$T_1^*(s) = \begin{cases} \begin{cases} T_{\max 1} acc & (n_1 < n_e) \\ 9549 P_{\max 1} acc / n_1 & (n_1 \geq n_e) \end{cases} & (Bar \leq 0) \\ \begin{cases} -T_{\max 1} Bra & (n_1 > n_e) \\ 9549 P_{\max 1} Bra / n_1 & (n_1 \geq n_e) \end{cases} & (Bar > 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 acc 为加速踏板强度, Bra 为制动踏板强度, $T_1^*(s)$ 为电机 1 目标转矩, $T_{\max 1}$ 为电机 1 峰值力矩, $P_{\max 1}$ 为电机 1 峰值功率, n_1 电机输出转矩, n_e 电机额定转速。

2.2.2 高速双电机模式

在高速双电机模式下,将驾驶员的意图解释为电机 1、电机 2 的转矩指令。电机 1 的目标转矩 $T_1^*(s)$ 经过优化计算后满足

$$T_1^*(s) = \begin{cases} f_d \left(acc, n_1, \frac{n_1 + kn_2}{1+k} \right) & (Bra \leq 0) \\ f_b \left(Bra, n_1, \frac{n_1 + kn_2}{1+k} \right) & (Bra > 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中 n_2 为电机 2 输出转速, k 为简单行星齿轮组特性参数。电机 2 的目标转矩 $T_2^*(s)$ 满足

$$T_2^*(s) = \begin{cases} \begin{cases} T_{\max 2} acc & (n_2 < n_e) \\ 9549 P_{\max 2} acc / n_2 & (n_2 \geq n_e) \end{cases} & (Bar \leq 0) \\ \begin{cases} -T_{\max 2} Bra & (n_2 > n_e) \\ 9549 P_{\max 2} Bra / n_2 & (n_2 \geq n_e) \end{cases} & (Bar > 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $T_2^*(s)$ 为电机 2 目标转矩, $T_{\max 2}$ 为电机 2 峰值扭矩, $P_{\max 2}$ 为电机 2 峰值功率。

2.3 模式切换过程中的动态协调控制

为了使模式切换更加平顺,在整个模式切换过程中需要利用对电机 2 的输出调节实现柔性模式切换,减小制动器与齿圈的速度差,从而减小冲击。由行星齿轮的转矩关系可知,在模式切换的过程中需要满足电机 2 输出扭矩为电机 1 输出扭矩的 k 倍,即 $T_2^*(s) = kT_1^*(s)$,为了满足该条件,在电机 1 的最高转速附近对电机 1 进行降功率控制,在模式切换区域电机 1 的功率随转速的增加逐渐减小,从而减小模式切换过程对电机 2 力矩输出的需求,减小模式切换的冲击。

车辆由低速模式切换到高速模式的过程中,电机 1 工作于最高转速附近,一直处于驱动状态,电机 2 可通过零速转矩调节使齿圈所受的合力矩较小或者为零,以方便制动器解除。当制动器完全解除后,电机 2 转为驱动状态,实现高速两台电机功率耦合。因此模式切换无动力中断功能,可以使车速上升或至少保持不变。在车辆由高速模式切换到低速模式的过程中,电机 2 通过再生制动迅速将齿圈转速减小,当齿圈转速小于某一值时,通过零速制动使齿圈所受的合力矩较小或者为零,方便制动器将齿圈锁止,齿圈锁止后电机 2 处于关闭状态,车辆工作于单电机工作模式。

3 控制器系统设计

双电机行星耦合驱动系统功能的实现完全依赖于电机 1、电机 2 以及制动器的配合,如何配合及如何通过控制来实现是系统控制策略的基本问题。双电机行星耦合驱动控制系统组成如图 2 所示。为实现协调控制,引入 CAN 总线以实现整车控制器、电机 1 控制器、电机 2 控制器、制动器控制器之间的通信。电机 1 控制器、电机 2 控制器可在任何时刻响

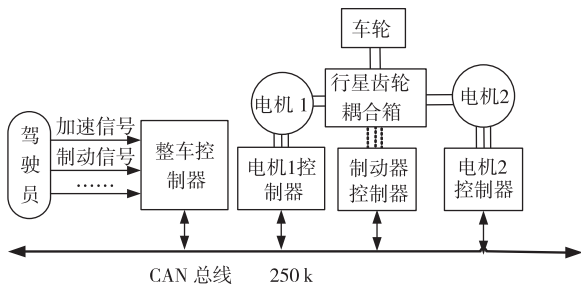


图2 双电机行星耦合驱动控制系统组成

应整车控制器对其提出的转速和转矩要求,制动器控制器可在任何时刻响应整车控制器对其提出的解锁或锁止齿圈的要求,这不仅提高了控制系统集成度,并且有利于提高整车的动力性和舒适性。

双电机行星耦合驱动控制系统的工作原理如下:整车控制器根据加速信号、制动信号、电机转速及车速等信息计算出合适的行驶模式以及驱动转矩,通过 CAN 总线向电机 1、电机 2 控制器发送电机工作状态及目标指令,电机控制器进行相应操作,同时向制动器控制器发送是否需要模式切换的指令。若需要模式切换,制动器执行机构进行锁止齿圈或解锁齿圈的操作,根据反馈的制动器执行机构的状态判断是否操作到位,然后整车控制器向电机 1、电机 2 控制器发送新的工作指令。双电机行星耦合驱动系统综合控制策略流程图如图 3 所示。

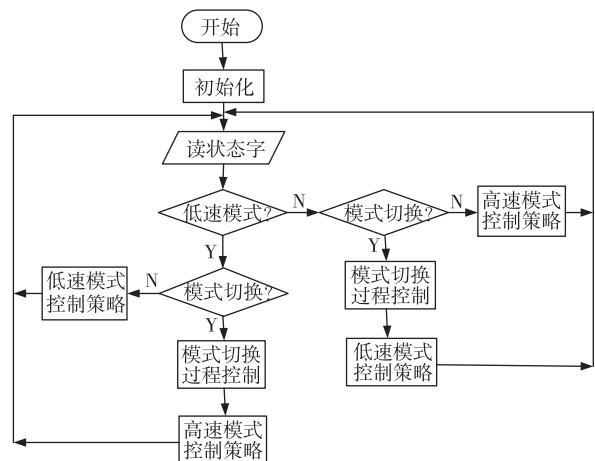


图3 综合控制策略流程图

4 仿真验证

纯电动大客车双电机行星耦合传动仿真平台在 MATLAB/Simulink 环境中建立,仿真过程采用前向仿真的方式,顶层仿真模块结构简图如图 4 所示。图中各子模型分别为驾驶员模型、控制策略模型、电机 1 及控制器模型、电机 2 及控制器模型、行星齿轮耦合箱模型、大客车动力学模型。仿真车型整车基

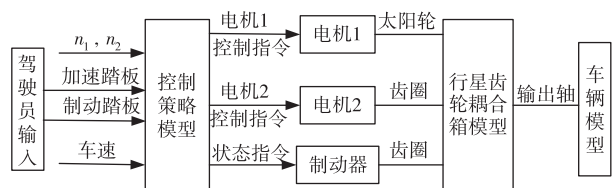


图4 仿真模型结构简图

本参数如表 2 所示。电机 1、电机 2 为参数相同的永磁同步电机。由于本研究的重点是双电机行星耦合驱动系统的控制策略,对蓄电池不研究,因此假设在驱动状态下蓄电池荷电状态(SOC)足以满足车辆的动力需求,在制动状态下,SOC 允许驱动电机进行制动能量回收。

表 2 仿真车型整车基本参数

参数值	
整备质量 m	18000kg
驱动形式	后轮驱动
迎风面积 A	7.5438 m ²
空气阻力系数 C_d	0.8
滚动阻力系数 f	0.015

(续表 2)

参数值		
附着系数 ψ	0.7	
滚动半径 r	0.47825m	
驱动电机及控制器	额定功率/峰值功率	60kW/120kW
	额定转速/最高转速	2500rpm/6000rpm
	额定效率	0.94
耦合箱	行星轮特性参数 k	3.5
	二级减速比 i_1	1.8
	传动效率	0.9
驱动桥速比 i_0	6.34	

图 5 是包含起步、加速、匀速和减速等工况的仿真试验结果,包括踏板强度、车速、电机 1 与电机 2

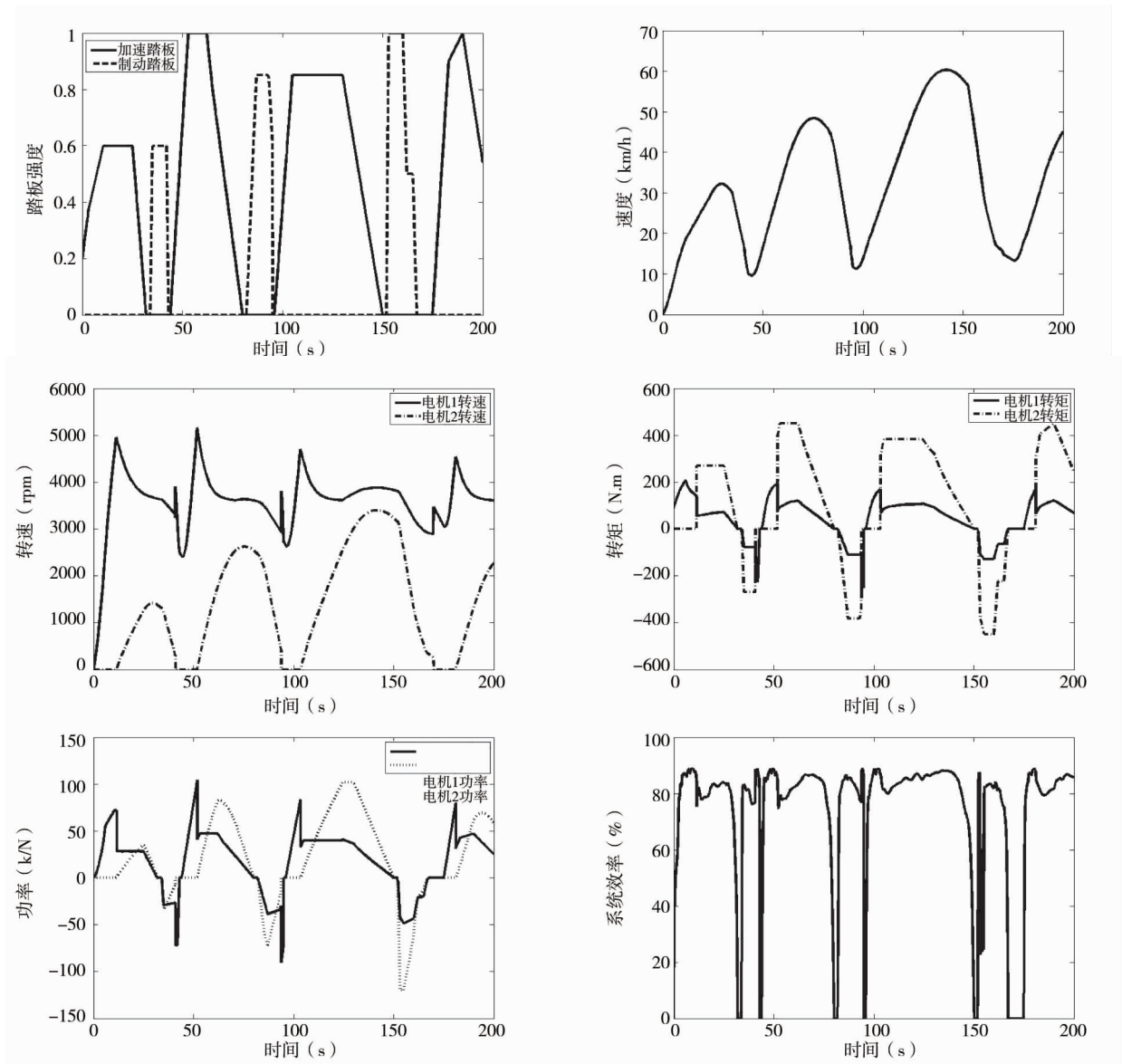


图 5 仿真试验结果

的输出特性及系统效率随仿真时间的变化曲线。在起步加速过程中,当车速低于 20km/h 的情况下,车辆由电机 1 单独驱动,随着车速的增加,电机 2 转速增加,电机 1 转速减小至额定转速附近,车辆由双电机共同驱动。在车辆的制动过程中,高速时由两个电机同时回馈制动,低速时由电机 1 回馈制动。由系统的效率曲线可以看出,整个仿真过程中的驱动状态和制动状态下系统效率都在 80% 以上。仿真结果表明:低速单电机驱动模式下的转矩控制策略优先满足了车辆动力性的需求,高速双电机耦合驱动模式下的优化控制策略能够有效提高系统的效率。

5 结 论

本文以 18 吨纯电动客车双电机耦合传动系统为研究对象,开展了双电机行星耦合驱动系统综合控制的研究,探索出一套适用于双电机行星耦合驱动系统综合控制策略,并通过仿真分析得到以下结论:双电机行星耦合驱动系统中的控制逻辑均可以使各动力部件良好地协同工作,车辆可以正确地实现驾驶员的操作意图,且体现了各个模式下的车辆工作特点,所开发设计的控制逻辑正确有效。

参考文献

[1] Miller J M, Everett M. An assessment of ultra-capacitors

as the power cache in Toyota THS-II, GM-Allision AHS-2 and Ford FHS hybrid propulsion systems. In: Proceedings of the 20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Austin, USA, 2005. 481-490

- [2] 高建平,何洪文,孙逢春. 混合动力电动汽车机电耦合系统归类分析. 北京理工大学学报, 2008, 28(3): 197-201
- [3] 赵治国,何宁,朱阳等. 四轮驱动混合动力轿车驱动模式切换控制. 机械工程学报, 2011, 47(4): 100-109
- [4] 秦大同,游国平,胡建军. 新型功率分流式混合动力传动系统工作模式分析与参数设计. 机械工程学报, 2009, 45(2): 84-191
- [5] Huang Y J, Yin C L, Zhang J W. Development of the energy management strategy for parallel hybrid electric urban buses. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 21(4): 44-50
- [6] 张昕,宋建峰,田毅等. 基于多目标遗传算法的混合动力电动汽车控制策略优化. 机械工程学报, 2009, 45(2): 36-40
- [7] 朱道伟,谢辉,严英等. 基于道路工况自学习的混合动力城市客车控制策略动态优化. 机械工程学报, 2010, 46(6): 33-38
- [8] Xiong W W, Yin C L, Zhang Y, et al. Series-parallel hybrid vehicle control strategy design and optimization using real-valued genetic algorithm. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(6): 862-868
- [9] 童毅,欧阳明高,张俊智. 并联式混合动力汽车控制算法的实时仿真研究. 机械工程学报, 2003, 39(10): 156-161

Control of a dual-motor coupling drive system on EV buses

Wu Xiaohua, Yin Xiaofeng

(Institute of Automotive Engineering, Xihua University, Chengdu 610039)

Abstract

A study of control of a practical dual-motor coupling drive system on electric vehicles (EV) was conducted. The dual-motor planetary coupling drive systems were divided into the low-speed single motor mode and the high-speed dual-motor mode according to their structures and working principles. Then, the control strategies for different modes and the mode switching process were made, and the controller and control processes were designed. And finally, they were verified by simulation. The test results showed that this controller for the practical dual-motor coupling drive system can ensure the distribution of dual-motor power, and enhance the system efficiency under the condition of satisfying driver's requirement on torque.

Key words: dual-motor, coupling drive, control strategy, electric vehicle