工程技术与管理 · 第 03 卷 · 第 07 期 · 2019 年 09 月
DOI: https://doi.org/10.26549/gcjsygl.v3i7.2197

Research and Application of Independent Drive Vehicle Control with 4-Wheel Hub Motor Based on Vehicle Dynamics and Distributed Drive Control

Lei Bao　Kangtai An

Hebei Youkong New Energy Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

Electric vehicle has become an important direction of the development of the automobile industry. Generally speaking, electric vehicle drives the vehicle by driving the front or rear axle of the motor directly, and its control technology is becoming more and more mature. Major automobile enterprises and scientific research institutions have accumulated mature experience in the development of electric vehicle control. At present, electric vehicle based on hub motor has become the main research direction of electric vehicle, but its control technology and application experience need to be improved and optimized step by step. The main purpose of this paper is to study and apply the control of electric vehicle with hub motor. It mainly adopts the scheme based on dynamics and distributed driving algorithm, optimizing and replacing the original simple non-distributed control algorithm. The whole vehicle controller judges the steering intention of the vehicle according to the steering wheel angle signal input by the driver, and realizes the wheel speed in steering process by controlling the torque difference between the two sides of the hub motor according to the actual vehicle state. The poor control improves the steering stability and reduces the steering shortage, thus improving the steering stability and driving comfort of the vehicle.

Keywords

electric vehicle; distributed control; hub motor; 4-wheel drive

基于车辆动力学及分布式驱动控制的 4 轮毂电机独立驱动车辆控制研究与应用

包蕾　安康泰

河北优控新能源科技有限公司，中国 · 河北 石家庄 050000

摘　要

电动汽车目前已经成为汽车行业发展的重要方向，通常意义上的电动汽车是利用驱动电机直驱前轴或后轴从而驱动车辆，而其控制技术也日渐成熟，各大车企和科研机构都积累了成熟的电动车控制开发经验。目前来看，基于轮毂电机的电动汽车也成为了电动汽车研究的主要方向，但其控制技术及应用经验还需要逐步提高和优化。本文主要是针对轮毂电机的电动汽车进行控制上的研究及应用，主要是采用基于动力学及分布式驱动算法的方案进行控制，优化和替代原有简单的非分布式控制算法。整车控制器根据驾驶员输入的方向盘转角信号判断车辆转向意图，根据实车的状态通过控制两侧轮毂电机的扭矩差值来实现转向过程中的轮速差控制，提高了转向过程中的稳定性及减少了转向不足，从而提高了整车的转向稳定性及驾驶舒适性。

关键词

电动汽车；分布式控制；轮毂电机；四轮驱动

1 引言

基于车辆动力学及分布式驱动的轮毂电机车辆控制主要是根据车辆运动姿态及驾驶员输入对车辆运动过程中纵向力和横向力的控制，从而实现了车辆的直线行驶和转向行驶。安装有轮毂电机的电动汽车的动力来源为轮毂电机，车辆纵向力和横向力的控制是通过控制轮毂电机的扭矩来实现的，故电机扭矩控制是采用矢量扭矩来控制的，通过控制车辆两侧驱动电机的输出扭矩差的大小及方向从而实现了车辆的前进行驶（直线、左转向、右转向）和倒退行驶（直线、左转向、右转向），从而实现了驾驶员的车辆操控目的。

而采用分布式驱动控制的电动汽车相比较于只是通过转向机构的车辆来说提高了转向稳定性及瞬态响应性、转向通过性，降低了转向不足性。

2 车辆动力学参数建模计算

根据车辆动力学及运动学使用 SIMULINK 开发工具建立车辆 3 自由度模型，对车辆运动过程中 x 轴、Y 轴、Z 轴的运动状态及受力进行分析，保证车辆稳定行驶。如果车辆配备 IMU（惯性测量单元），则以下侧向加速度、纵向加速度、横摆角速度信号可以直接从 IMU 采集得来。但为了整个控制系统的冗余性，通过建立车辆动力及运动模型计算车辆姿态参数也是必要的。[1]

2.1 质心车速建模计算

由于轮毂电机的电动汽车没有 ESP、车速传感器，故没有直接的车速信号来源，这里采用电机的转速来计算车辆的车速的建模方法。同时因为车辆动力总成结构的不同，4 个电机转速在各种运动工况下具有不同程度的差异，例如在打滑、抱死、悬空、转向过程必然会导致 4 个轮毂电机转速的差异性，所以为了得到精确的车速这里计算的是车辆质心点的质心车速。

轮毂电机转速转换成车轮速度的计算公式为：

$V = 0.06 * n * 2\pi r$，其中 n 为电机转速，r 为车辆轮胎半径。

根据上述公式计算出每个车轮的车速，然后利用 SIMULINK 搭建车辆运动模型，根据车轮的状态（打滑、抱死）、转向状态（转向半径）来修正车速对应车辆质心点的车速，然后把 4 个车轮对应质心点的 4 个车速进行加权平均得出最后的车辆质心点车速。

2.2 车辆纵向加速度计算

对车辆质心车速进行求导，得出车辆纵向加速度，具体计算过程如下：

x：车速 m/s

y：纵向加速度 m/s^2

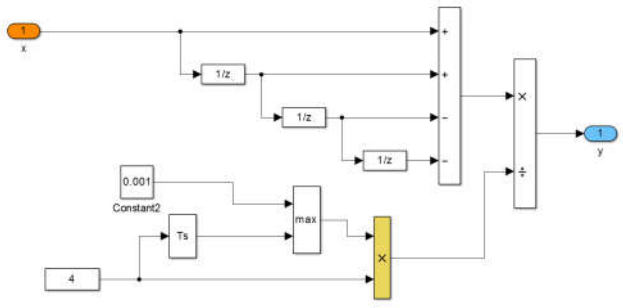

图 1 纵向加速度计算

具体为：y = [(x[k] − k[k−2])/(2*dt) + (x[k−1] − x[k−3])/(2*dt)] / 2

= (x[k] + x[k−1] − x[k−2] − x[k−3]) / (4*dt)，

同时对计算得出的纵向加速度进行 PT 滤波处理，使计算得到的纵向加速度值平稳输出 [2]。

2.3 车辆侧向加速度计算

车辆侧向加速度根据车辆横摆角速度和车辆纵向车速来计算。

Ay=w * u，其中 w 为横摆角速度（° /s），u 为纵向车速（m/s）。

2.4 车辆横摆角速度计算

横摆角速度根据车辆转向时左、右两侧转速差计算得来：

wr=((nr−nl)*(π/30)*r/B

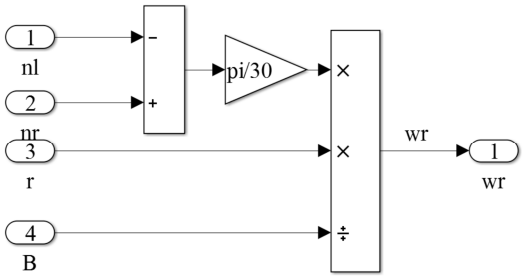

图 2 横摆角速度计算

其中：wr: 横摆角速度；

nr：右侧电机转速；

nl：右侧电机转速；

r：车轮半径；

B：轮距；

3 分布式驱动控制开发

在 SIMULINK 开发环境中搭建车辆控制策略模型，并进行 MIL 仿真测试，满足功能要求后生成 C 代码集成到硬件控制器中，HIL 测试完成后到样车上进行测试验证标定工作。

分布式驱动控制的核心为在纵向扭矩控制的基础上，根据方向盘转向角信号计算侧向扭矩，然后根据实际工况对纵向扭矩和侧向扭矩进行矢量计算，最终把计算需求扭矩分配给各个轮毂电机。同时控制轮毂电机的扭矩输出达到车辆直线行驶、转向行驶、制动能量回收的驾驶需求。[3]

3.1 纵向扭矩计算

纵向（直行）扭矩根据加速踏板、制动踏板查表得出驾

工程技术与管理 · 第 03 卷 · 第 07 期 · 2019 年 09 月
DOI: https://doi.org/10.26549/gcjsygl.v3i7.2197

驶扭矩（轮端扭矩），然后根据电池包的最大放电功率限制、电池包的最大充电功率限制、整车速度限制，结合车辆档位状态、传动轴速比、驱动电机能力得出最后的电机扭矩需求。

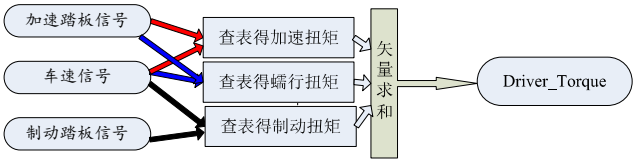

图 3 驾驶者扭矩计算逻辑图

（1）加速驱动扭矩

整车加速驱动扭矩为 MAP 表，根据整车车速和实际加速踏板开度查表得出。

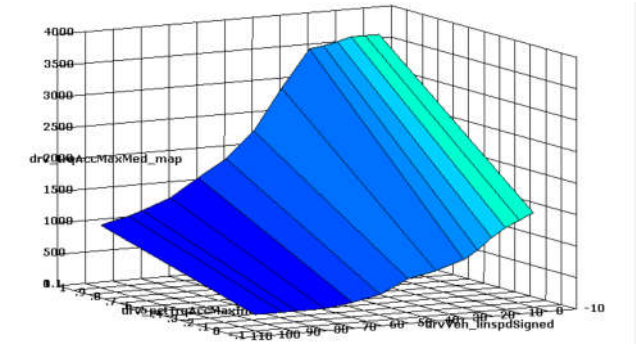

图 4 驾驶者扭 MAP 图

（2）制动能量回收扭矩

制动能量回收扭矩是基于车速查表，同时根据制动踏板开度修正制动能量回收扭矩 [4]。

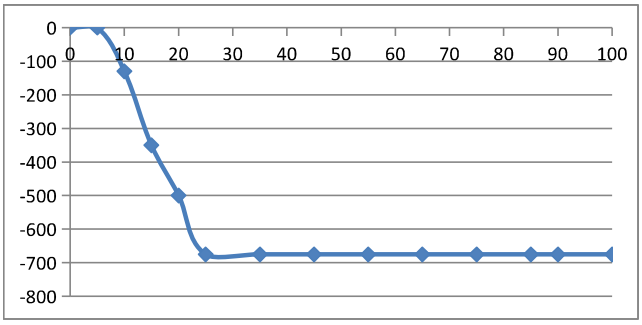

图 5 能量回收扭矩曲线图（车速 – 扭矩）

3.2 侧向扭矩计算

侧向目标扭矩采用目标横摆角速度的方法得到，根据当前车速以及方向盘转角查表得到目标横摆角速度，然后与车辆实际的横摆角速度做差，得到一个偏差值，将偏差值作为输入，经过 PID 调节输出当前侧向力矩，控制侧向扭矩达到目标横摆角速度，使车辆按照驾驶员方向盘转角输入得到理想的车辆左右 2 侧的轮速差，从而控制车辆转向，使车辆转向更平稳 [5]。

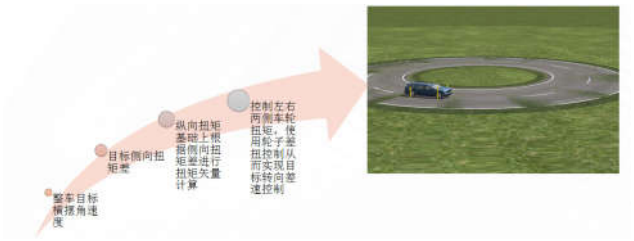

图 6 侧向扭矩计算原理

3.3 扭矩矢量控制分配

车辆行驶工况整体可以分为 2 种，直线行驶和转向行驶，这里也是根据 2 种基本工况对电机扭矩进行分配 [6]。

3.3.1 直线行驶工况扭矩分配

在直线行驶工况中对扭矩进行分配是将驾驶扭矩平均分为左、右两个单侧扭矩。然后根据电机的能力分配同侧的 2 个电机的扭矩输出，这里需要注意是为同一轴两侧的 2 个驱动电机扭矩输出要保证一致，从而保证车辆直线行驶，避免由于两侧电机扭矩输出不一致导致车辆偏航行驶。

3.3.2 转向行驶工况扭矩分配

转向行驶工况的扭矩分配也是扭矩矢量控制的重要核心部分，在转向过程中不仅仅是合理分配驱动扭矩，同时也需要合理分配制动能量回收扭矩，从而保证车辆稳定转向行驶。

整体的扭矩矢量分配原则是在驾驶扭矩基础上，把根据 PID 控制得到的目标侧向扭矩作为转向行驶过程中的车辆两侧的目标扭矩差，使车辆两侧的驱动电机扭矩输出不一致，从而达到了车辆 2 个车辆的轮速不一致，实现了辅助转向的目的。

4 车辆稳定性控制

一般情况下，轮毂电机的汽车没有安装 ABS 和 ESP 来实现避免抱死、打滑的问题，所以这里使用轮毂电机来实现抱死、打滑工况的处理，保证车辆行驶安全。

如果车辆配有 ABS 和 ESP 控制器，那么整车控制器 VCU 需要和 ABS、ESP 进行信号交互，协调控制车辆稳定性。[7]

4.1 车轮制动抱死扭矩控制

在车辆减速和制动工况时，整车控制器 VCU 实时检测 4 个车轮（轮毂电机）的速度信号，用车轮的速度车速信号与车辆质心车速信号进行比较，当车轮的速度信号小于车辆车速信号一定值（10km/h，TBD）时，判断此轮子处于抱死状态，

则整车控制器 VCU 取消此车辆对应的轮毂电机的制动扭矩输出，消除车轮抱死状态。

同时在取消轮毂电机的制动扭矩输出时也需要考虑车辆直行、转向行驶的工况，同时对同一轴的轮毂电机扭矩进行取消控制，避免车辆出现其他行驶问题 [8]。

4.2 车轮打滑扭矩控制

在车辆加速行驶工况时，整车控制器 VCU 实时检测 4 个车辆（轮毂电机）的速度信号，用车轮的速度信号与车辆质心车速信号进行比较，当车轮的速度信号大于车辆车速信号一定值（10km/h，TBD）时，判断此轮子处于打滑状态，则整车控制器 VCU 减小此车辆对应的轮毂电机的扭矩输出，直至消除车轮打滑状态 [9]。

5 控制系统的仿真与应用

5.1 设计开发仿真

5.1.1 CarSim 和 SIMULINK 联合仿真

在 CarSim 软件搭建车辆模型，并对车辆参数进行配置，包括整车质量及尺寸参数、制动系统参数、转向系统参数、悬架系统参数、轮胎系统参数等。[10]

在 SIMULINK 环境中开发整车控制策略模型、动力模型。

其中动力模型包括轮毂电机仿真模型、动力电池包仿真模型。

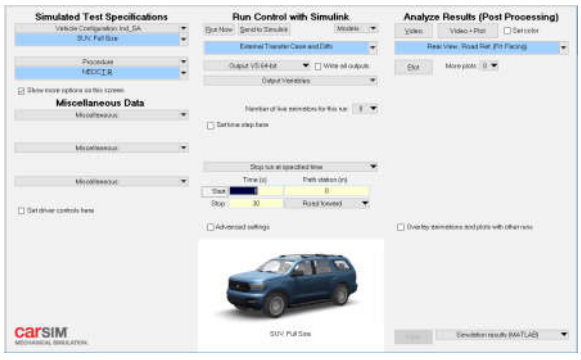

图 7 CarSim 车辆仿真模型

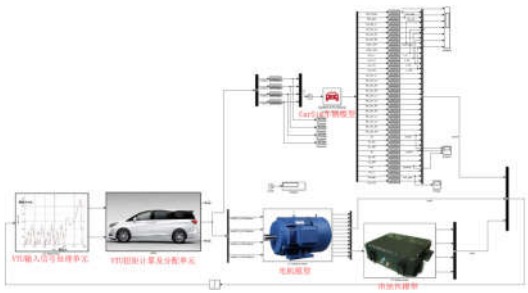

图 8 CarSim 和 SIMULINK 联合仿真模型

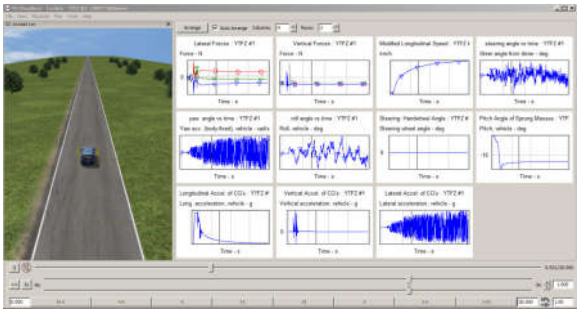

图 9 CarSim 和 SIMULINK 联合仿真结果示例

5.1.2 HIL 测试仿真

在 HIL（硬件在环）测试设备上搭建轮毂电机车辆模型，调整标定参数使整车控制器分别关闭分布式驱动算法和开启分布式驱动控制算法，对相同转向工况进行对比，通过以下数据可知，分布式驱动的车辆在相同车速和方向盘转角转向半径小于非分布式驱动控制，提高了车辆转向通过性能。

图 10 HIL 测试仿真界面

轮毂电机车辆非分布式控制：

踩下加速踏板、D 档，方向盘向打 50 度（左转），4 个轮毂电机扭矩输出一致，无差速控制，车辆向左转向行驶，稳定后转向半径为 200m，见图 11。

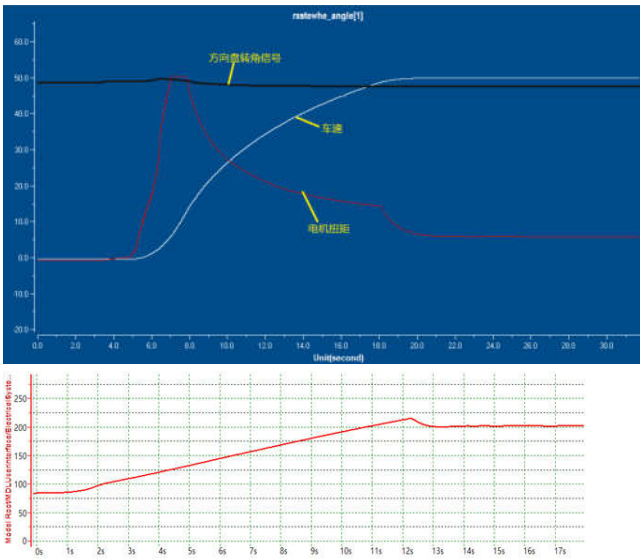

图 11 非分布式驱动电机扭矩输出和转向半径曲线

工程技术与管理 · 第 03 卷 · 第 07 期 · 2019 年 09 月
DOI: https://doi.org/10.26549/gcjsygl.v3i7.2197

轮毂电机车辆分布式控制：

踩下加速踏板、D 档，方向盘向打 50 度（左转），4 个轮毂电机扭矩输出不一致右侧电机扭矩输出大于左侧电机输出扭矩，实现了差速控制，车辆向左转向行驶，稳定后转向半径为 180m，见图 12：

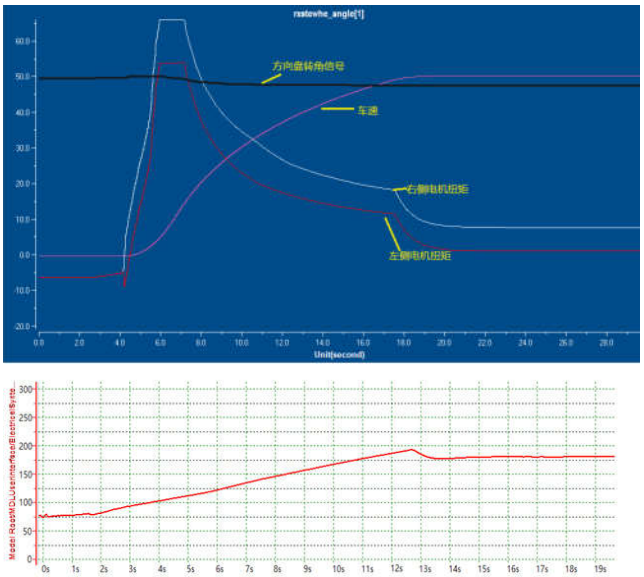

图 12 分布式驱动电机扭矩输出和转向半径曲线

5.2 案例实际应用

对于以上分布式驱动的研究已经在实际的轮毂电机 4 驱电动车辆上进行验证，并根据“GBT 6323−2014 汽车操纵稳定性试验方法”标准中稳态回转实验操作步骤及实验内容在试验场实际操作开车录制的数据，并对数据进行分析，针对非分布式驱动和分布式驱动的车辆进行数据对比，具体数据如表 1：

表 1 非分布式和分布式控制稳态回转实验对比数据

分布式控制		左转		右转	
		非分布式控制	分布式控制	非分布式控制	
中性转向点的侧向加速度 ax/（m/s^2）		1.447	1.725	1.287	1.665
Ay=2m/s^2 时	不足转向度 U/[(°)/(m/s^2)	0.2642	0.5352	0.108	0.267
	车身倾斜度 K/[(°)/(m/s^2)	———	———	———	———

根据此实验数据可得出以下结论：

（1）分布式驱动控制提高了转向性能，降低了转向不足的特性，不足性降低了 50%。

（2）车辆原车底盘转向结构矫正存在误差，左转和右转性能不一致，原车转向结构左转比右转转向不足性更大，接近 50%。

6 结语

在新能源轮毂电机车辆的整车控制上，采用分布式驱动扭矩矢量控制（差速 / 差速控制）算法相比较于简单的非分布式驱动控制（4 轮平均分配）在车辆转向工况的转向稳定性、转向不足性上更具有优势，在很大程度上提高了轮毂电机车辆的转向通过性、瞬态响应性性能，保证了车辆的性能。

同时，关于轮毂电机的分布式驱动控制开发与研究还需要在更多的车型、轮毂电机上验证，最终达到成熟状态。同时在分布式驱动控制算法开发的基础上，也需要考虑利用控制算法消除原车转向结构的跑偏误差、轮毂电机参数及响应等方面的误差，保证轮毂电机控制策略更加成熟，更加具有适应性及普遍性。

参考文献

[1] The MathWorks Inc.Simulink CoderTarget Language Compiler[M],2013.

[2] 孙忠潇 .Simulink 仿真及代码生成技术入门到精通 . 北京航空航天大学出版社 ,2015.8.

[3] [美]Iqbal Husain 著 . 纯电动及混合动力汽车设计基础 (原书第 2 版)[M]. 林程译 . 北京 : 机械工业出版社 ,2012.

[4] 徐国凯等 . 电动汽车驱动与控制 [M]. 北京 : 电子工业出版社 ,2011.

[5] 邱云鹏 . 纯电动汽车整车控制器的研究 [D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学 ,2014.

[6] 崔胜民 . 新能源汽车技术 [M]. 第 2 版 . 北京 : 北京大学出版社 ,2014.

[7] 徐仕华 . 纯电动汽车驱动系统与性能研究 [D]. 南昌大学 ,2012.

[8] 黄启然 , 郑玲 , 李以农 , 卢少波 . 四轮独立驱动电动汽车轮毂电机控制策略研究 . 汽车工程 ,2014(第 36 卷) 第 10 期 .

[9] 余志生 . 汽车理论 , 机械工业出版社 ,2006.

[10] 迪特尔 · 施拉姆 , 曼弗雷德 · 席勒 , 罗伯托 · 巴迪尼 . 车辆动力学建模与仿真 . 化学工业出版社 ,2017.