分布式驱动车辆转矩控制试验研究

杨乐　梅志鹏　魏广杰　游道亮

（江铃汽车股份有限公司，南昌 330031）

【摘要】为提高分布式驱动车辆整车转矩控制策略的合理性，基于优化扭矩分配策略提出了减少前后双电机同步过零工况的控制策略，以改善整车共振、冲击等问题，针对低电量状态下急加速等典型工况，提出一种转矩跟随滤波优化控制方法，以改善因系统能力不足导致的车辆起步加速过缓问题。试验结果表明：所提出的过零控制策略有效优化了双电机同步过零整车冲击问题，整车转矩滤波优化控制方法在保证车辆驾驶舒适性的同时，使车辆在馈电状态下特征点处整车加速度提升0.62 m/s²。

关键词：分布式驱动　驾驶性能　过零控制　转矩滤波

中图分类号：U469.72；U461.2；U461.4　　**文献标志码：**A

DOI： 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250103

Experimental Research on Torque Control of Distributed-Drive Vehicles

Yang Le, Mei Zhipeng, Wei Guangjie, You Daoliang

(Jiangling Motor Co., Ltd., Nanchang 330031)

【Abstract】To enhence the rationality of the vehicle torque control strategy for distributed-drive vehicles, this paper proposes a control strategy based on an optimize torque distribution strategy to reduce the operating conditions of synchronous zero-crossing of the front and rear dual motors, thereby improving issues such as vehicle resonance and impact. In addition, for typical operating conditions such as rapid acceleration with a large throttle depression when the battery has low power, a torque following filtering optimization control method is proposed to improve the problem of slow vehicle acceleration caused by insufficient system capacity. The test results show that the proposed zero-crossing control strategy effectively optimizes the problem of vehicle impact caused by the synchronous zero-crossing of dual motors; the proposed vehicle torque filtering optimization control method increases the vehicle's acceleration at a characteristic point by 0.62 m/s² in a power-feedback state, while ensuring driving comfort.

Key words: Distributed drive, Driving performance, Zero-crossing control, Torque filtering

【引用格式】杨乐, 梅志鹏, 魏广杰, 等. 分布式驱动车辆转矩控制试验研究[J]. 汽车工程师, 2026(2): 27-32.

YANG L, MEI Z P, WEI G J, et al. Experimental Research on Torque Control of Distributed-Drive Vehicles[J]. Automotive Engineer, 2026(2): 27-32.

1　前言

分布式驱动电动汽车凭借其驱动传动链短、传动高效、结构紧凑等优势[1]，成为新能源汽车的重要发展方向。但多电机独立控制使分布式驱动电动汽车的转矩控制系统更加复杂，因此，合理的转矩控制策略对整车加速能力和驾乘舒适性提升至关重要。

整车控制器（Vehicle Control Unit，VCU）是转矩控制的核心，电驱动系统需快速响应其目标转矩请求。电机过零（Zero-Crossing）控制是转矩控制的核心难点[2]，过零时间过长会导致动力损失，过短则易造成整车抖动、齿轮敲击噪声，加速部件磨损。因此，过零过程的精细控制与标定是分布式驱动电动汽车开发的关键任务。

为解决该问题，目前行业内的主流方案是采用过零转矩范围低转矩梯度控制，结合电机转速波动阻尼调节[3]；赵治国等[4]针对急加速（Tip-In）

和急减速（Tip-Out）工况，通过前馈校正与防抖控制优化过零过程；江怡等[5]基于车辆参数与转矩需求变化，提出转矩变化率限值确定方法，提升转矩输出平滑性；陈子榕等[6]通过过零工况识别控制转矩及其变化率，优化冲击与噪声；王东等[7]融合转矩与电驱动总成壳体振动信号判定过零区间并开展优化控制；谢文等[8]聚焦四驱模式切换，动态调节前后电机转矩分配比，优化双电机同步过零问题。

此外，转矩滤波控制策略是影响整车动态性能的关键因素之一。井俊超等[9]开发了工况识别自适应滤波方法，结合车辆驱动/回收状态、驾驶模式、车速等参数动态调整转矩滤波梯度，保障行驶平顺性。工程实践表明，转矩滤波梯度的设计需进行性能权衡：滤波梯度设置过缓会导致传动系统响应迟滞，难以满足驾驶员的动力需求；滤波梯度设置过快则会引起动力输出突变，易导致驾乘人员产生眩晕等不适感。

针对上述问题，本文开展双电机四轮驱动车辆过零工况控制策略与转矩滤波策略的优化研究。

2 驱动转矩控制

2.1 双电机过零转矩控制

在急加速和急减速工况下，车辆驱动/回收状态切换将不可避免地产生转矩过零工况。在传统控制策略中，为简化标定流程，通常对前、后轴电机采用相同的转矩滤波梯度。然而，当前、后电机滤波起始转矩相近时，将出现双电机同步过零现象。前、后电机滤波起始转矩的设定受整车转矩分配策略直接影响，不同的分配系数对应不同的起始转矩。因此，本文首先基于前、后电机转矩分配系数对同步过零工况进行精确识别，为后续策略优化奠定基础。

前、后轴电机的滤波起始转矩差值可表示为：

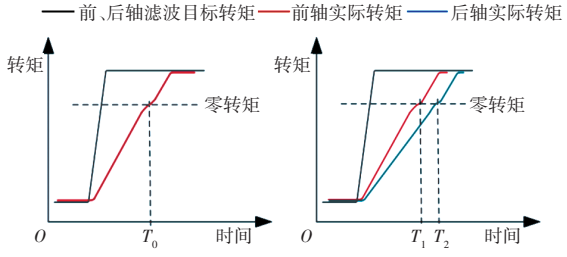
$$\Delta T=T_{\text{demand}}\cdot|k_{\text{f}}-k_{\text{r}}| \tag{1}$$

式中：k_{f}、k_{r}分别为前、后轴电机转矩分配系数，T_{demand}为基于加速踏板解析的驾驶员需求转矩，ΔT为前、后电机目标转矩差值。

当ΔT大于前、后轴电机滤波起始转矩差值的判断阈值m_k时，前、后电机转矩滤波的修正系数$F_{\text{ac_f}}$、$F_{\text{ac_r}}$均设为1，即前、后轴转矩滤波采用相同的滤波梯度，不会出现前、后电机同步过零现象，无需修正；当$\Delta T<m_k$时，易出现同步过零问题，需对前、后电机的过零策略进行优化。

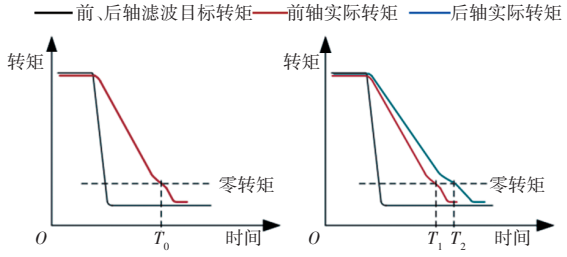
根据前、后电机的实际转矩分配系数对电机的转矩滤波梯度进行修正：若$k_{\text{f}}<k_{\text{r}}$或$k_{\text{r}}\approx k_{\text{f}}$，设定$F_{\text{ac_r}}$为小于1的系数，$F_{\text{ac_f}}=1$；若$k_{\text{f}}>k_{\text{r}}$，设定$F_{\text{ac_f}}$为小于1的系数，$F_{\text{ac_r}}=1$。$F_{\text{ac_f}}$和$F_{\text{ac_r}}$的数值需根据$|k_{\text{f}}-k_{\text{r}}|$进行标定修正。

急加速和急减速工况下，强制四驱模式前、后轴50∶50转矩分配系数下采用不同的过零策略，如图1、图2所示。



（a）采用相同滤波梯度　（b）电机同步过零优化

图1　急加速工况前后等比分配不同过零策略对比



（a）采用相同滤波梯度　（b）电机同步过零优化

图2　急减速工况前后等比分配不同过零策略对比

由图1a、图2a可知，由于电机滤波起始转矩相同或接近，前、后轴电机实际转矩在T_0时刻附近同时过零。由图1b、图2b可知，在电机滤波起始转矩相同或接近时，通过对单轴滤波梯度进行修正，前、后电机交替穿越零转矩区间，在一台电机过零时，另一台电机补充转矩需求[10]，实现了前、后轴分别在T_1和T_2时刻过零，平衡了整车动力性和舒适性需求。

2.2 转矩跟随滤波控制

在过零阶段之外，电机实际转矩以一定梯度跟随目标转矩，直至达到目标转矩，定义此阶段为转矩跟随滤波（Reach-Target）阶段。此过程又可分为快速跟随滤波和接近滤波两个阶段。车辆在相同驾驶模式和加速踏板开度动态输入条件下，无论电池放电能力（荷电状态）如何变化，均应具备相同的加速响应和驾驶舒适性。因此，转矩跟随滤波阶段应保证快速跟随滤波梯度的一致性和接近滤波梯度的平顺性。

本文以原地起步工况为例，针对车辆在不同荷

电状态条件下的转矩跟随滤波过程进行分析。

转矩滤波的控制逻辑如图3所示，某车型驱动加速状态下电机转矩滤波梯度MAP如表1所示。

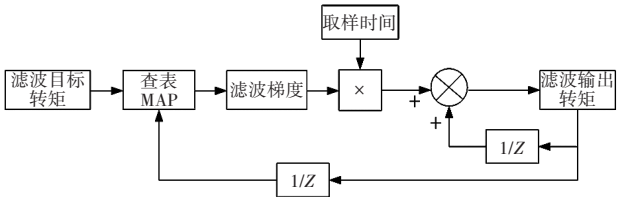
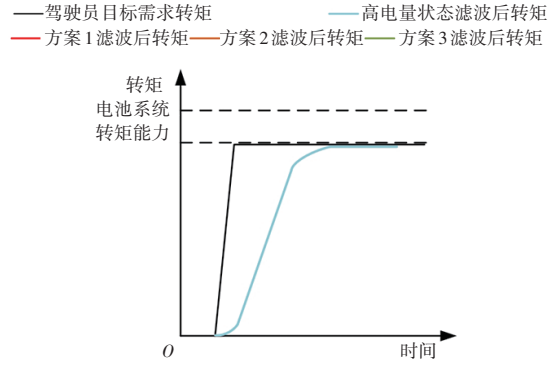


图3　转矩滤波控制逻辑

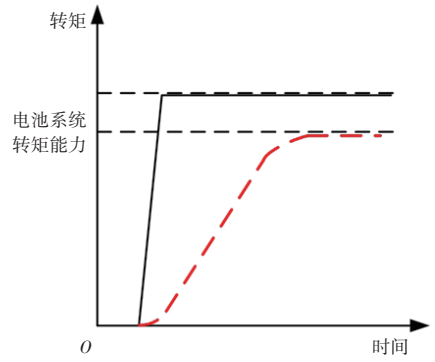
表1　转矩滤波梯度MAP示意　　N·m/s

实际转矩/N·m	目标转矩/N·m												
	0	5	10	20	40	60	100	140	180	220	260	300	350
0	60	70	80	80	90	90	100	120	140	160	180	200	200
5		60	70	100	120	150	180	200	240	260	280	300	300
10			60	120	180	280	300	350	350	350	350	350	350
20				60	200	280	300	350	350	350	350	350	350
40					60	200	300	350	350	350	350	350	350
60						60	200	300	350	350	350	350	350
100							60	200	300	350	350	350	350
140								60	200	300	350	350	350
180									60	200	300	350	350
220										60	200	300	350
260											60	200	300
300												60	200
350													60

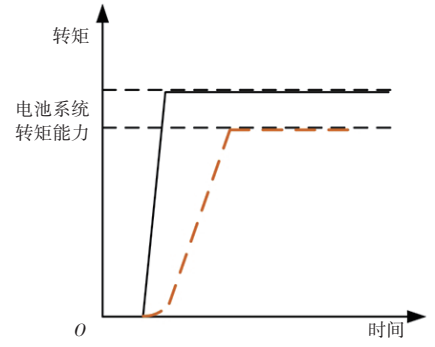
在电池高荷电状态阶段，电池系统的驱动转矩能力可满足驾驶员的加速转矩需求，此过程以驾驶员需求转矩为滤波目标转矩，如图4a所示。在电池低荷电状态阶段，电池系统的驱动转矩能力不能满足驾驶员的转矩需求，此时分别采用电池系统驱动转矩能力（方案1）或驾驶员需求转矩（方案2）作为滤波目标转矩，如图4b和4c所示。



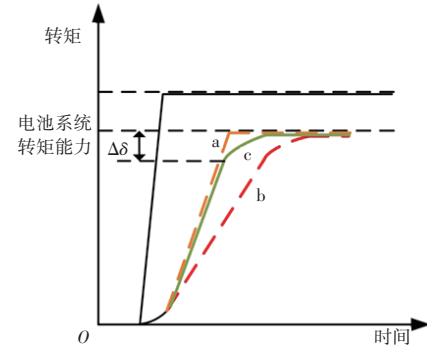
（a）高荷电状态转矩滤波



（b）低荷电状态方案1转矩滤波



（c）低荷电状态方案2转矩滤波



（d）低荷电状态不同滤波方案对比

图4　电池系统不同驱动转矩能力和滤波策略转矩控制效果

图4c的快速跟随滤波梯度与图4a一致，但无接近滤波过程，加速度瞬间达到稳定状态，可能存在冲击和转矩超调，极易引起乘员不适；图4b中虽存在接近滤波阶段，但由于采用电池系统驱动转矩能力作为滤波目标转矩，其快速跟随滤波梯度明显较图4a小，表明该过程车辆的加速响应偏慢，不符合该加速踏板开度下驾驶员的期望加速度。为改善该问题，本文采用阶段滤波控制的方案3（见图4d），即基于加速踏板开度解析的需求转矩T_{demand}小于考虑电池系统约束时系统的驱动转矩能力T_{sys}时，滤波目标转矩$T_{tgt}=T_{demand}$，当$T_{demand}>T_{sys}$时，需根据实时电机输出转矩T_{act}进行滤波目标转矩的切换：

$$\begin{cases} T_{tgt}=T_{sys},\ T_{act}>T_{sys}-\Delta\delta \\ T_{tgt}=T_{demand},\ T_{act}<T_{sys}-\Delta\delta \end{cases} \tag{2}$$

式中：$\Delta\delta$为滤波控制参数，用于控制快速跟随滤波阶段和接近滤波阶段的切换时机。

采用该阶段滤波控制方案时，电池高荷电状态下的转矩控制效果应如图4a所示，电池低荷电状态下的转矩控制效果应如图4d中曲线c所示，二者理应具备类似的控制效果。

3 试验验证

为进一步验证控制效果，基于本文控制方法搭建控制软件模型，并在某前、后双电机四轮驱动SUV车型上进行了试验研究。试验车辆及其动力系统部件参数如表2所示。

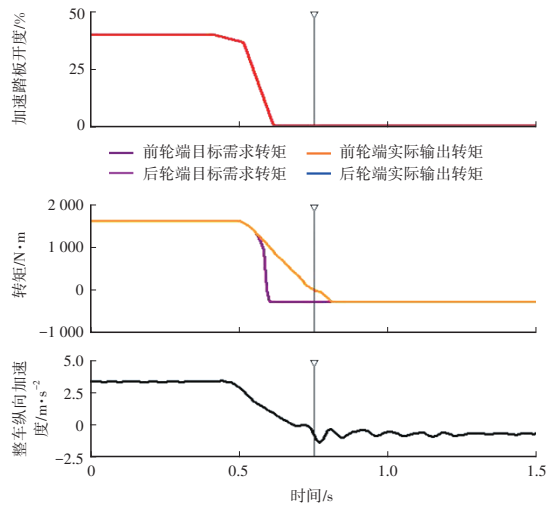
表2 试验车辆及其动力系统部件参数

参数		取值
车辆参数	整备质量/kg	2 640
	轴距/mm	2 950
前电机	最高转速/r·min^{-1}	16 000
	峰值功率/kW	120
	额定功率/kW	60
	峰值转矩/N·m	330
后电机	最高转速/r·min^{-1}	16 500
	峰值功率/kW	155
	额定功率/kW	62
	峰值转矩/N·m	312
动力电池	容量/kW·h	43
	峰值放电功率/kW	205
增程器系统	发动机排量/L	1.5
	额定发电功率/kW	60
	峰值发电功率/kW	120

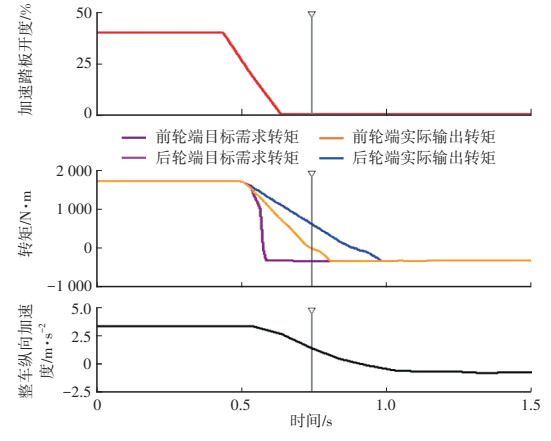
3.1 不同过零策略下的实车对比试验

以40%加速踏板开度驱动条件下的急减速工况为例，分别针对前后轴等比分配同步过零、前后轴等比分配非同步过零和前后轴非等比(40∶60)分配等梯度过零策略进行实车测试，结果如图5所示。

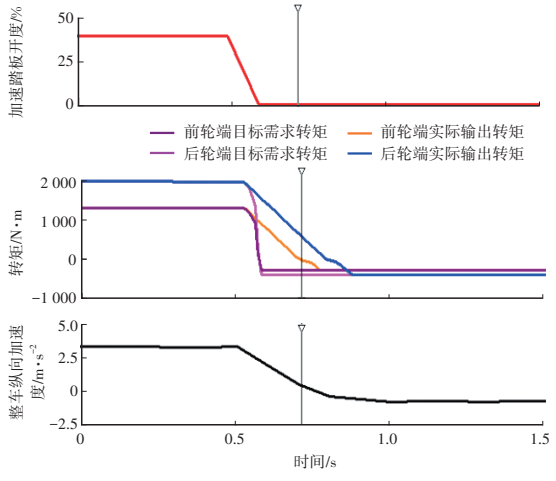
对比分析图5a和图5b中车辆纵向加速度变化情况可知，在前后轴等比分配策略下，采用异步过零策略明显比同步过零策略时具有更好的整车平顺性。由图5c可知，在前后轴分配比差异较大的情况下，即使前、后轴过零梯度一致，也不会产生过零冲击或整车平顺性问题。



(a)前后轴等比分配同步过零转矩控制



(b)前后轴等比分配非同步过零转矩控制



(c)前后轴非等比分配等梯度过零转矩控制

图5 不同过零转矩控制策略下实车对比试验结果

3.2 不同滤波策略下的实车对比试验

以低荷电状态下全油门加速工况为例，分别采用以电池系统转矩能力作为滤波目标转矩、以驾驶员需求转矩作为滤波目标转矩和阶段滤波策

略的3种滤波控制策略进行实车试验，结果如图6所示。

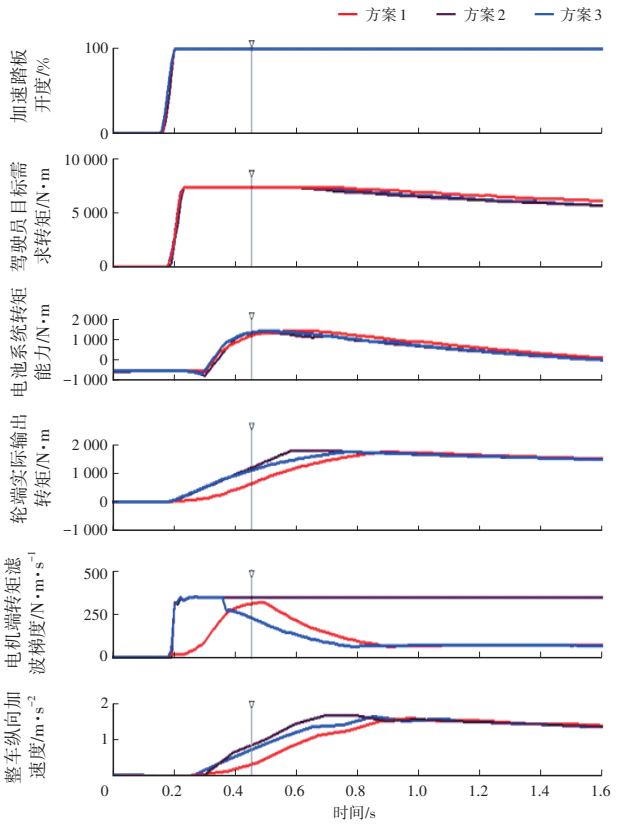


图6　不同转矩滤波策略的控制效果

由图6可知，在电池系统转矩能力远小于驾驶员需求转矩的条件下：采用以电池系统转矩能力作为滤波目标转矩时，由于其能力较小，查表获取的转矩滤波梯度较小，导致整车加速较慢；由于驾驶员需求转矩远大于电池系统转矩能力，采用以驾驶员需求转矩作为滤波目标转矩时，其查表获取的梯度明显较大（电机端约360 N·m/s），整车加速性能最好，但在轮端实际转矩达到电池系统转矩能力时，其加速度变化率较大，主观感觉加速过程稍显突兀；采用阶段滤波控制方案时，既能保证前段具有较大的滤波梯度，使车辆有较好的加速表现，又能在轮端实际转矩接近电池系统转矩能力的过程中逐渐减缓滤波梯度，使得整车加速更平顺。试验数据表明，该工况下采用阶段滤波方案在特征点处整车加速度达到0.73 m/s^2，远大于以电池系统转矩能力作为滤波目标转矩时所获得的加速度0.11 m/s^2。

4　结束语

本文从整车驱动转矩控制的实际需求出发，聚焦双电机四轮驱动车辆前、后电机同步过零问题，通过识别前后电机转矩分配系数判断是否处于同步过零状态，进而制定针对性滤波策略。实车试验结果表明，该方法对同步过零工况的识别效果显著，所制定的滤波策略具备合理性，能够有效优化前、后电机同步过零产生的车辆冲击与抖动问题。此外，非等比分配下的转矩等梯度过零策略在大幅减少标定工作量的同时，还能保证整车具有良好的驾驶性能。

此外，本文提出的阶段滤波策略在应对电池系统能力不足的情况（如车辆处于馈电状态）时，对整车动力性和平顺性展现出了良好的控制效果。实车试验结果进一步表明：该策略能够通过加快上升阶段的转矩滤波梯度显著提升转矩响应速率，从而有效满足车辆动力性要求；在转矩接近过程中，能够精细控制转矩滤波梯度，实现转矩的平滑变化，充分满足驾驶平顺性要求。

参　考　文　献

[1] 余卓平, 冯源, 熊璐. 分布式驱动电动汽车动力学控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 105-114.
YU Z P, FENG Y, XIONG L. Review on Vehicle Dynamics Control of Distributed Drive Electric Vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 105-114.

[2] 阳鹏, 裴赫. 纯电动四驱汽车分轴过零控制策略研究[J]. 汽车文摘, 2023(2): 55-58.
YANG P, PEI H. Research on Zero-Crossing Control Strategy of Sub-Axle for Pure Electric 4-Wheel-Drive Vehicles[J]. Automobile Digest, 2023(2): 55-58.

[3] 周重光, 莫崇相. 电驱转矩过0的整车防抖控制设计[J]. 汽车工程, 2025, 47(2): 315-325.
ZHOU C G, MO C X. Design of Vehicle Anti Jerk Control on Electric Motor Torque Near Zero[J]. Automotive Engineering, 2025, 47(2): 315-325.

[4] 赵治国, 王晨, 张彤, 等. 纯电动Tip-In/Out工况的前馈校正与主动阻尼防抖控制[J]. 汽车工程, 2018, 40(1): 19-27+75.
ZHAO Z G, WANG C, ZHANG T, et al. Anti-Shake Control with Feed-forward Correction and Active Damping Control in Tip-In/Out Phases of Pure Electric Driving[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(1): 19-27+75.

[5] 江怡. 一种纯电动汽车转矩滤波控制方法: CN201811024089.X[P]. 2021-10-08.
JIANG Y. A Torque Filtering Control Method for Pure Electric Vehicles: CN201811024089.X[P]. 2021-10-08.

[6] 陈子榕, 杜智勇, 肖恺. 电机转矩过零控制方法、电机转矩过零控制装置及车辆: CN202311160255.X[P]. 2024-

06-21.
CHEN Z R, DU Z Y, XIAO K. Motor Torque Zero-Crossing Control Method, Motor Torque Zero-Crossing Control Device and Vehicle: CN202311160255.X[P]. 2024-06-21.

[7] 王东, 陈锦霞, 王永超, 等. 一种新能源车辆电机扭矩过零区间判定及控制方法、系统: CN202410799878.X[P]. 2024-07-19.
WANG D, CHEN J X, WANG Y C, et al. A Method and System for Judging and Controlling the Zero-Crossing Interval of the Motor Torque of a New Energy Vehicle: CN202410799878.X[P]. 2024-07-19.

[8] 谢文, 张明, 杨健, 等. 电动汽车适时四驱转矩协调的控制方法、程序产品和车: CN202411201581.5[P]. 2024-12-24.
XIE W, ZHANG M, YANG J, et al. Control Method, Program Product and Vehicle for Torque Coordination of Real-Time Four-Wheel Drive in Electric Vehicles: CN202411201581.5[P]. 2024-12-24.

[9] 井俊超, 刘义强, 黄伟山, 等. 一种电机转矩滤波控制方法、系统及混合动力车辆: CN202180004528.4[P]. 2024-05-03.
JING J C, LIU Y Q, HUANG W S, et al. A Motor Torque Filtering Control Method, System and Hybrid Electric Vehicle: CN202180004528.4 [P]. 2024-05-03.

[10] 余卓平, 张立军, 熊璐. 四驱电动车经济性改善的最优转矩分配控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(10): 1355-1361.
YU Z P, ZHANG L J, XIONG L. Optimized Torque Distribution Control to Achieve Higher Fuel Economy of 4WD Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(10): 1355-1361.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2025年8月4日。

（上接第26页）

YU Z S. Automobile Theory[M]. The 6th Edition. Beijing: China Machine Press, 2018.

[9] DING S H, SUN J L. Direct Yaw-Moment Control for 4WID Electric Vehicle via Finite-Time Control Technique[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 88: 239-254.

[10] TIAN Y T, CAO X H, WANG X Y, et al. Four Wheel Independent Drive Electric Vehicle Lateral Stability Control Strategy[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(6): 1542-1554.

[11] 郭建华. 双轴汽车电子稳定性协调控制系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
GUO J H. Research on Electronic Stability Coordination Control System of Two-Axle Automobile[D]. Changchun: Jilin University, 2008.

[12] 向婧燕, 周奎, 付勇智, 等. 考虑稳定性的4WD/4WS无人车路径跟踪控制策略研究[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(6): 349-358.
XIANG Q Y, ZHOU K, FU Y Z, et al. Research on Path Tracking Control Strategy of 4WD/4WS Unmanned Vehicle Considering Stability[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(6): 349-358.

[13] WANG Z P, WANG Y C, ZHANG L, et al. Vehicle Stability Enhancement Through Hierarchical Control for a Four-Wheel-Independently-Actuated Electric Vehicle[J]. Energies, 2017, 10(7): 1-18.

[14] PENG H N, WANG W D, AN Q, et al. Path Tracking and Direct Yaw Moment Coordinated Control Based on Robust MPC with the Finite Time Horizon for Autonomous Independent-Drive Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6053-6066.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2024年12月10日。