

电驱转矩过0的整车防抖控制设计

周重光, 莫崇相

(奇瑞汽车股份有限公司研发总院, 芜湖 241000)

[摘要] 在研究结合整车应用场景和电驱转矩过0的整车防抖控制需求的基础上, 本文从整车控制防抖的角度提出了包括传动间隙、转矩限制、电驱转矩过0以及转速波动高频去噪4个整车防抖控制需求和软件实现架构。基于防抖控制需求设计了电驱转矩过0的整车防抖控制算法架构及控制策略, 并给出相应控制过程及计算分析。通过对所设计的防抖控制策略进行仿真及实车测试, 证明该控制算法架构及算法策略能有效实现整车的防抖功能。同时根据实车测试车辆的纵向加速度曲线和电驱的转速波动值可知, 所设计的算法架构及控制策略在车辆驾驶性上取得了很好的效果。

关键词: 电动车; 转矩过0; 整车防抖

Design of Vehicle Anti Jerk Control on Electric Motor Torque Near Zero

Zhou Chongguang & Mo Chongxiang

Chery Automobile Co., Ltd., R&D Institute, Wuhu 241000

[Abstract] Based on the research on the combination of vehicle application scenarios and electric drive torque near zero anti-jerk control requirements, in this paper four vehicle anti-jerk control requirements and their software architectures from the perspective of vehicle anti-jerk, including transmission clearance, torque limitation, electric drive torque near zero, and high-frequency de-noising of wheel speed fluctuation. Based on the requirements of anti-jerk control, vehicle anti-jerk algorithm architecture as well as the control strategy with electric motor torque near zero is designed, and the corresponding control process and calculation analysis are provided. Through simulation and real vehicle testing of the designed anti-jerk control strategy, it is proved that the control algorithm architecture and strategy can effectively achieve the anti-jerk function of the vehicle. According to the longitudinal acceleration curve of the real vehicle test and the fluctuation of the electric drive speed, it can be seen that the designed software architecture and control strategy have achieved good results in vehicle drivability.

Keywords: electric vehicle; torque near zero; vehicle anti-jerk

前言

新能源汽车区别于传统燃油车最显著的特点是驱动核心部件发生了根本性的变化, 电驱作为新能源汽车的主要动力驱动单元, 其不仅提供功率的输出, 还作为发电机进行整车能量回收。针对这一点, 新能源汽车具有较好的长期应用前景。相较于发动机, 电驱在动力响应方面具有先天优势, 但电驱在转

速波动敏感、转矩换向以及低转动惯量等方面特点决定了其在转矩过0防抖控制^[1-3]将成为整车控制系统的难点和基础技术。关于电驱的防抖, 相关研究论文^[4-5]只是从电驱动力源端进行控制, 而忽视了从整车控制(VCU)的需求端解决防抖, 容易造成VCU需求端与动力源端无法有效协调控制。目前行业VCU针对电驱过0常用控制措施是在电驱转矩过0范围内采用较低的转矩梯度控制, 然后电驱在响应VCU转矩目标的同时根据电驱转速波动值进行阻尼

(行业称为 Damping 阻尼)实现过 0 控制。鉴于整车控制实际情况,分析发现现存控制策略存在 3 点不足:第 1 点就是过 0 控制转矩范围及过 0 梯度得不到精准控制;第 2 点就是没有考虑到整车各种工况场景需求以及将各工况的需求层次进行有效融合;第 3 点就是针对具体电驱的防抖控制分散在整车控制内部多个模块,而不是针对电驱转矩管理集中式的防抖阀门控制,通用性较差。基于此,本文从整车控制的角度设计了针对电驱转矩过 0 防抖的通用控制算法架构及算法策略,该算法架构和算法策略有效融合了整车控制针对某电驱各工况防抖需求和过 0 的精准控制,其成功提高了车辆的防抖效果和软件模块的通用性,提高了整车的鲁棒性和商品性。

1 防抖需求来源

分析电驱 0 转矩附近抖动的机理^[4-5],从整车控制的角度主动消除电驱系统的抖动。根据整车涉及到电驱系统产生的抖动工况场景提出相应的防抖控制需求,然后将这些需求设计成一个结构有序的软件模型算法架构以及算法策略,最终实现各类防抖功能需求。由于电驱系统产生抖动主要表现为电驱转速^[1]或转矩 0 位置的抖动,但其引起抖动的根本原因为整车实时动态控制目标没有充分考虑到电驱的响应能力及两者的有效配合。基于前人研究成果及实际开发过程中遇到的问题,本文提出从电驱的传动间隙、转矩限制、转矩过 0 梯度控制以及转速波动高频去噪等 4 个方面来介绍其功能需求,并为其设计一个合理的算法架构来协调解决电驱的抖动及功能融合。4 种功能需求的提出是综合了整车工况场景与电驱防抖的融合,具体其需求来源设计出发点如下。

(1) 传动间隙控制需求来源于低速工况的传动间隙控制场景,其目标旨在消除传动自由行程状态的预处理控制。

(2) 转矩限制控制需求来源于对驾驶需求转矩的限制,旨在降低有增加整车抖动趋势的特殊工况的驱动转矩。

(3) 电驱转矩过 0 控制需求来源于对电机驱动与回收动力交变场景的一种精确有效控制,其包括滑行和制动两种不同工况需求,旨在精确识别过 0 及采用合适的工况梯度控制过 0。

(4) 转速波动高频去噪需求来源于对转速波动阻尼防抖的一种主动式缓解抖动的补偿,旨在降低电驱阻尼转矩的波动范围。

(5) 整车控制对某电驱的防抖集成于一个模块,做到一个电驱一个防抖模块的集中式阀门控制管理,旨在提高软件模块的通用性。

1.1 齿轮传动间隙防抖

由于传动间隙的存在,当啮合齿面从正向转向反面传动的过程中就会产生一个自由空转角行程冲击,称这个过程为 Back Lash 过程。消除齿轮啮合自由间隙控制有两种控制方式,即靠齿转矩和 Back Lash 梯度控制(图 1)。靠齿转矩是提前施加消除电驱传动间隙而不引起抖动的低值转矩,该转矩为消除传动间隙的预处理转矩。通过此法,其消除了电驱转子在 0 转矩的自由状态。而 Back Lash 控制则是从另一角度来消除传动间隙的抖动,其是指驱动转矩变化时在 0 转矩附近施加一个较小的固定转矩(逻辑算法保证,见图 1)来消除传动间隙引起的抖动。从控制结果来看,靠齿转矩及 Back Lash 控制均能达到消除传动间隙抖动的目的,但两者实施的方式及时机并不一样,例如:靠齿转矩比较适合静车状态 D/R 挡切换或行车 0 转矩限制的情形;而 Back Lash 控制虽与后面分析的过 0 控制类似,但其不能精确识别过 0 和更适合于转矩过 0 固定梯度(其不能像过 0 根据工况改变过 0 的梯度)控制。

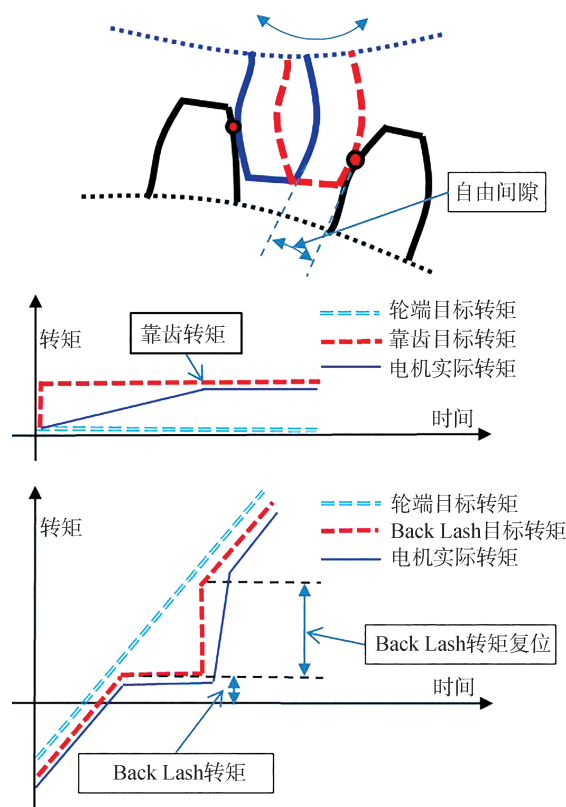


图 1 齿轮传动间隙控制需求

1.2 转矩限制控制防抖

转矩限制控制防抖有两种工况情形,即制动协调 Blend 限制以及车辆打滑转矩限制。制动协调 Blend 限制(也称为制动滤波)是指在制动工况时,为防止转矩出现直线转折而引起电驱转速波动,从而激起电驱阻尼(Damping)控制防抖。为减少电驱 Damping 转矩波动值,就要求在相应的车速及转矩段发生转折变化的部分设计制动转矩光滑曲线(图2),其应用场景有以下几点:

(1)当整车制动接近停车时,为避免车辆停止时电驱转矩超调,需要在车速接近于0时提前减缓电制动回收梯度。同时,为车辆底盘制动协调介入及退出进行匹配控制。

(2)为使整车制动减速度过程光滑,还须增加附加的制动力矩补偿,须提前预留可调转矩空间来统一协调各工况与制动转矩接口。

(3)当电驱回收接近于0转矩时,由于靠齿转矩的存在,制动协调可以消除轮端目标转矩由0突然增加至靠齿转矩产生的 Damping 抖动。

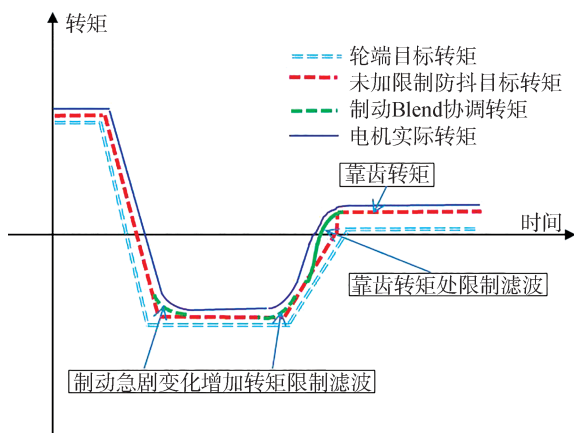


图2 制动协调转矩限制需求

当车辆出现打滑^[6](驱动轮与非驱动轮轮速差)时,电驱转矩会因为路面附着变差引起转速飙升(Flare)现象,特别是电驱转矩过0时的整车打滑工况的耦合防抖。根据耦合情形,具体控制分为转矩过0激活时的转矩限制和转矩过0非激活的转矩限制,其防抖需求(图3)要求如下:

(1)转矩过0标志未激活时,其输出为轮端及其它限制后的目标转矩。

(2)转矩过0标志激活时,取轮端目标限制后的转矩与基于轮速差计算的打滑限制转矩作比较,并且取较小的值作为输出。

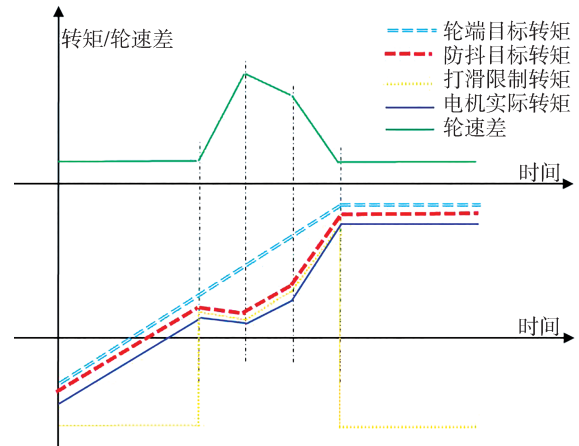


图3 打滑转矩限制需求

1.3 转矩过0控制防抖

电驱转矩过0控制防抖分为转矩向上过0控制防抖和转矩向下过0控制防抖。转矩向上过0为电驱转矩从负值到正值的转变,转矩向下过0为电驱转矩从正值到负值的转变。转矩过0控制就是控制电驱转矩正负值状态变化过程的转矩变化梯度,从而达到消除或减缓电驱的抖动。

由于传动齿轮间隙的存在,机械上的主动齿轮正齿面与背齿面交替变化时,必定会经过自由间隙状态。而机械自由状态变化会使得齿面发生撞击,从而产生抖动或发生撞击噪声。因此,为消除这种不利的现象,有必要控制电驱转矩的变化梯度(类似于动态的 Back Lash 控制)来达到防抖目的,使得电驱转矩变化和转速波动在可接受的范围内。另外,电驱过0控制结束时,防抖模块目标转矩恢复到整车电驱目标转矩须控制恢复转矩梯度,从而避免二次抖动。这样不仅可以有效控制动力响应过程,同时对于提高过0的防抖鲁棒性具有明显的意义。因此过0控制分为动态可控的 Back Lash 控制过程、转矩恢复过程以及过0标志的识别等功能防抖控制需求(图4)。

1.4 转速波动高频去噪防抖

电驱动为电功率转换,其电能转化为机械能远比发动机燃油燃料转化快得多,因此电驱的转矩响应速度远比发动机快,这是其优点。但因为电机的结构(滚动轴承和低惯量)及控制方式(基于调频控制转速),电驱控制对转速波动非常敏感。为此,在实现电驱转矩控制的同时,电驱转速波动阻尼也是其控制最为重要的一项。电驱的转速波动阻尼控制一般由电驱来控制,电驱 Damping 控制^[3]一般根据其

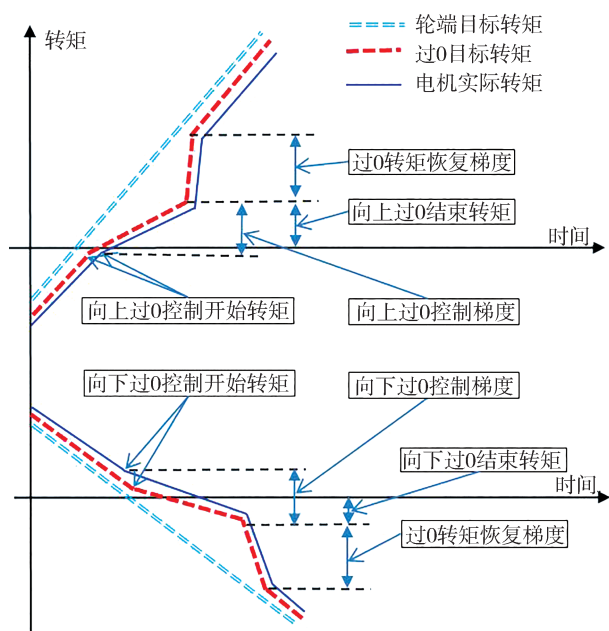


图4 电驱转矩过0控制需求

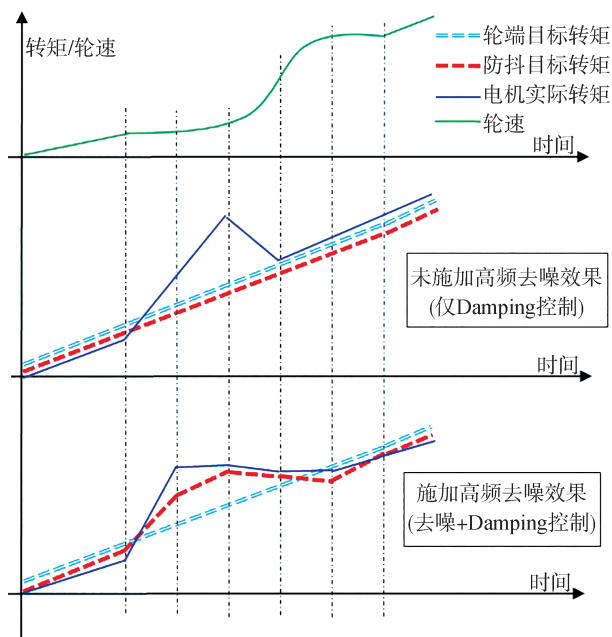


图5 转速波动高频去噪控制需求

转速的变化差值(P项调节)和变化差值梯度大小(D项调节)进行控制^[1-2]。其控制策略及方式同样适合于转速高频去噪的整车防抖控制,其具体PID调节计算公式如下:

$$T_p = \min[\max(\gamma_p \cdot \nabla N, T_{\min}^p), T_{\max}^p] \quad (1)$$

$$T_d = \min\{\max[\gamma_d \cdot \nabla(\nabla N), T_{\min}^d], T_{\max}^d\} \quad (2)$$

式中: T_p 和 T_d 为调节转矩; γ 为转换系数; ∇N 为转速差; T_{\min} 和 T_{\max} 为调节限制极值。

从整车的角度,如果驱动轮发生打滑时,同样会出现硬性连接的电驱转速飙升现象。因此可以基于轮速变化而施加给电驱的转速消除控制补偿(图5)。整车控制(VCU)在请求控制电驱的转矩时,还要考虑到轮速差变化时转矩补偿。这样不仅可以保证电驱转矩响应VCU的转矩请求目标,还进一步优化了电驱转速波动阻尼转矩,使得两者配合更加紧密。值得注意的是,VCU防抖考虑的转速高频去噪只是控制修正,减少电驱的阻尼转矩大小,并不能完全替代电驱的转速阻尼控制,因此需要对补偿作极值限制以保证不出现超调现象。

2 控制算法实现

2.1 防抖模块功能架构

为实现上文提到的防抖功能需求,软件需要设

计一个防抖模块的内部功能架构。合理地将每个防抖功能进行融合并安排防抖控制功能的先后顺序,基于如下的防抖需求转矩融合分析,可以得到整个模块的功能实现架构,如图6所示。

在图6中,制动协调转矩和靠齿转矩都是针对轮端正常目标转矩的适时替代修正,其与正常转矩的关系是取最大值,因此其在防抖模块的转矩链位置是与驾驶转矩平行的。Back Lash的控制则是根据需求端转矩 E 进行控制调节,其在转矩链架构中的位置应该放在 E 和 F 之间,其根据输入转矩进行逻辑保证标定固定梯度,同时考虑到Back Lash调节进入和退出的过渡梯度控制。基于轮速差的限转和电驱转矩向上过0则都是与图6中输出的转矩 F 进行取最小值的限制来达到防抖效果,因此转矩 F 、轮速差的限转 G 和电驱转矩向上过0目标转矩 H 处于平行的比较关系,其输出转矩取三者的最小值。然后将转矩 I 与电驱转矩向下过0的目标转矩 J 进行取最大值,从而得到前面3个防抖需求控制的目标转矩合并。同时,考虑转速波动高频去噪是针对防抖转矩控制的转速波动的补偿修正,其应该放置在最后目标防抖转矩输出的位置进行修正限制,其与前面输出转矩是逻辑减关系。最后,考虑到各防抖目标转矩及转矩过0后的转矩恢复,须增加转矩滤波模块(含梯度)进行过渡连接。

整车防抖控制算法模块结构及模块主要输入/输出信号:

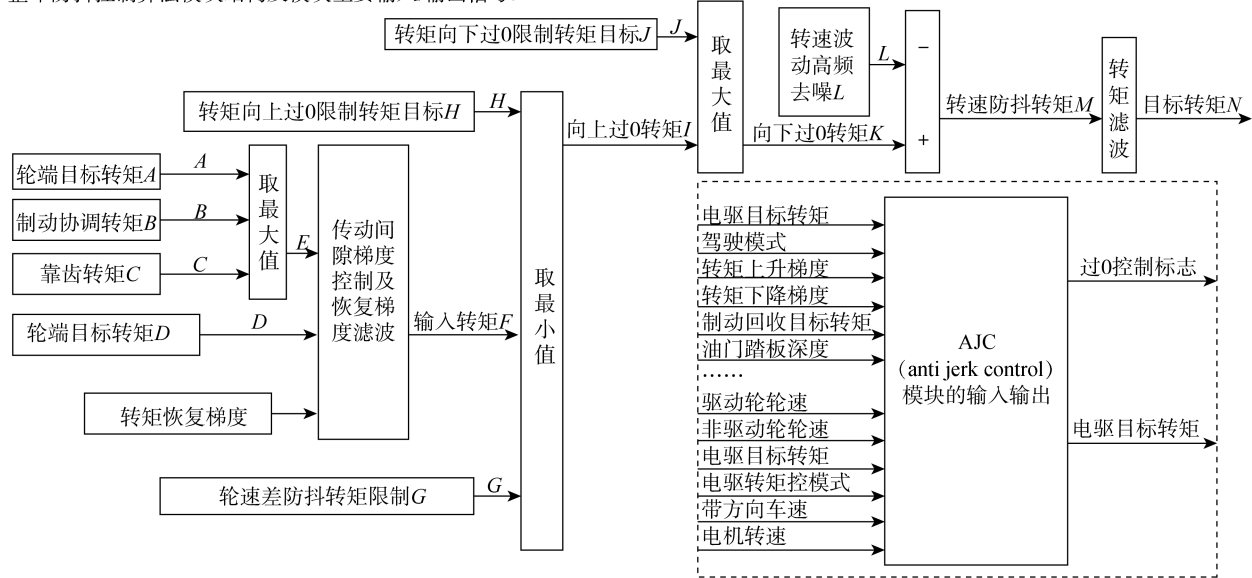


图6 防抖控制模块功能架构

2.2 防抖模块嵌入转矩链位置

根据防抖的控制需求,需要将其融合在整车控制软件的转矩链中来实现。由于防抖集成多个防抖功能需求,并从整车控制的角度来控制电驱的轮端目标转矩,因此防抖模块(anti-jerk control)是嵌入在电驱系统的转矩管理大模块之中。而在其内部又

位于分配给某一电驱的输入目标轮端转矩之后与电驱端的目标转矩之前的位置,具体如图7所示。根据整车的防抖功能作用,防抖是在整车轮端梯度和电驱端梯度调节的中间转矩控制环节,其类似一个外挂式的并联阀门控制装置(根据需要可任意拆装)。

防抖控制模块嵌入整车控制转矩链位置:

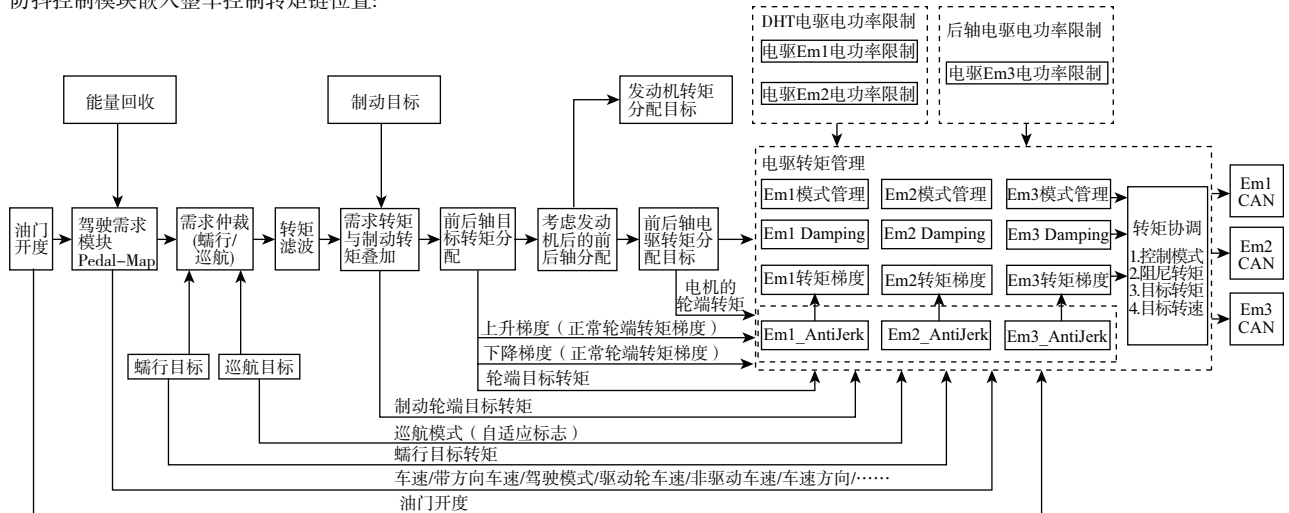


图7 防抖模块嵌入转矩链位置

值得注意的是,防抖模块是整车控制针对某一个电驱系统施加的控制。一般来讲,新能源车上集成了多个电驱单元,就应该有多个防抖模块。以公司某一动力总成四驱平台车型含有3个电驱为例,前2个为DHT传动箱内的电驱,另1个为后轴的驱

动电驱。这样为达到实现每个电驱的防抖控制,在VCU中须增加3个防抖模块。另外,虽然每个电驱的防抖模块内部结构一样,但根据动力总成内部结构和某一电驱的具体防抖要求,其在具体电控匹配开发过程中可以选用不同的防抖功能及标定策略。

3 防抖算法策略

为分析防抖具体控制过程,下面将从靠齿转矩控制、打滑控制、过0控制以及制动协调控制作为出发点来分析其控制实现过程和具体控制参数的计算推导。为方便表达,将上述几个控制工况放在一个转矩控制时序中进行分析,具体如图8所示。图8中: S_n 表示转速或车速对应角标位置; W_n 表示电驱轮端目标转矩对应角标位置; C_n 表示防抖输出轮端目标或电驱端转矩对应角标; t_n 表示控制时长。

为进行防抖控制相关基础转矩设置及控制过程目标转矩估算,需要引入整车参数、电驱硬件参数、电驱的基础转矩及响应的边界参数,这也是后面分

析防抖目标值计算的基础输入,具体定义如下:整车质量 m_{car} ;整车等效惯量系数 δ ;电驱转子惯量 I_{Em} ;电驱过0间隙角度 θ ;电驱转矩信号零漂 T_{Drift} ;电驱端至轮端速比 τ ;电驱过0允许最大Jerk轮端梯度 ζ_{max} ;滑行过0允许Jerk轮端转矩 T_{Jslip} ;制动过0允许Jerk轮端转矩 T_{Jbrk} ;电驱过0强制复位时间 t_{max} 。

3.1 靠齿转矩控制及 Back Lash 控制

防抖靠齿转矩值(轮端)一般取决于电驱速比和电驱完成靠齿转矩的乘积。根据靠齿转矩的应用场景,靠齿转矩对整车防抖性能目标可取转速波动差值和达到靠齿转矩的时间。实际根据电驱参数及力学原理推导可知图8中的靠齿转矩实际产生的抖动转矩(式(3))、靠齿时间(式(4))及转速波动差值(式(5))理论计算公式如下。

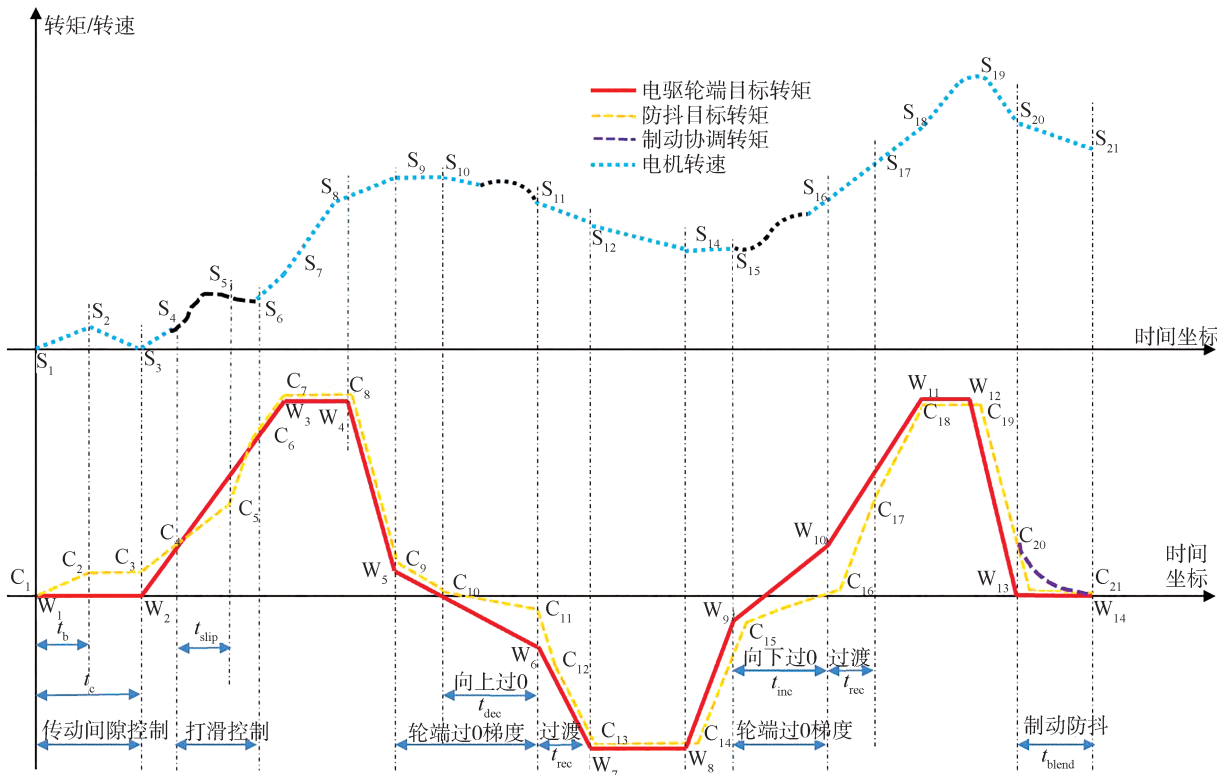


图8 防抖控制算法策略

$$T_{C_2} \leq \frac{\int_0^\theta \zeta d\theta}{t_{sim}} \quad (3)$$

$$t_b \geq \frac{T_{C_2} + T_{Drift} \cdot \tau}{\zeta_{max}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \nabla N_{t_b} = \int_0^{t_b} \frac{(T_{C_2} + T_{Drift} \cdot \tau) \cdot 60}{I_{Em} \cdot \tau \cdot 2 \cdot \pi} dt \\ \nabla N_{t_c} = \nabla N_{t_b} - \int_{t_b}^{t_c} \frac{T_{back} \cdot 60}{I_{Em} \cdot \tau \cdot 2 \cdot \pi} dt \end{cases} \quad (5)$$

式中: ζ 为标定控制靠齿的动态转矩梯度; t_{sim} 为程序仿真步长; T_{back} 为自由间隙 θ 结束时背齿阻力矩。

由上述靠齿转矩的计算公式可知,影响靠齿转矩控制性能因素有传动间隙 θ 和动态转矩梯度 ζ 。由于行业内的电驱传动间隙 θ 公差一般都控制在一定的范围内,因此实际控制靠齿转矩性能的关键是动态转矩梯度。值得注意的是,电驱在不同的转角内其转速对转矩梯度的敏感度并不相同。因此,根

据式(3)~式(5)可知减少转速波动值和靠齿时间 t_c 是一对矛盾的目标性能,为平衡两者的性能目标就要求最大化利用电驱转速不敏感角度范围内的转矩梯度。下面以图9所示的靠齿详细控制过程为例,根据式(3)~式(5)推导靠齿过程平衡转速最大波动值与最少靠齿时间的计算过程,具体如式(6)~式(9)所示。

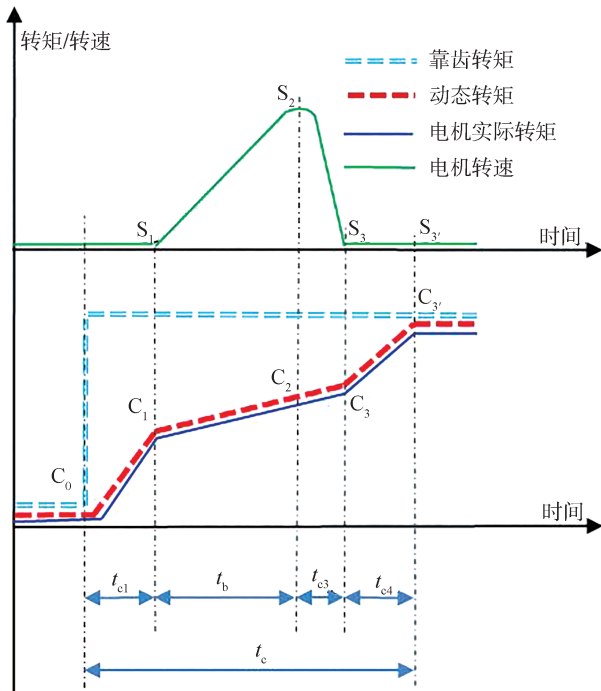


图9 靠齿控制动态梯度

$$t_{c_1} \geq \frac{T_{C_1} + T_{\text{Drift}}}{\zeta_{C_1}} \quad (6)$$

$$t_{c_2} \geq \frac{T_{C_2}}{\zeta_{C_2}} = \frac{\nabla N_{t_b} \cdot I_{Em} \cdot \tau \cdot 2 \cdot \pi}{(T_{C_2} - T_{C_1}) \cdot 60} \quad (7)$$

$$t_{c_3} \geq \frac{T_{C_3}}{\zeta_{C_3}} = \frac{\nabla N_{t_b} \cdot I_{Em} \cdot \tau \cdot 2 \cdot \pi}{(T_{C_3} - T_{\text{back}}) \cdot 60} \quad (8)$$

$$t_{c_4} \geq \frac{T_{\text{tooth}} - T_{C_3}}{\zeta_{C_4}} \quad (9)$$

式中: ζ_{C_i} 为控制靠齿各阶段的动态梯度; T_{tooth} 为靠齿转矩; T_{back} 为自由间隙 θ 结束时背齿阻力矩。

从式(6)~式(9)可以得出,整个靠齿过程时间为以上4个阶段的时间之和。在实车控制过程,想平衡整车靠齿时间与电驱转速波动,需要最大化利用靠齿过程转速未波动阶段和转速下降阶段的靠齿梯度,而控制转速差则根据式(5)计算出所需要的转矩梯度。

Back Lash 控制其控制原理与转矩过0原理基本一致,根据模型逻辑策略其控制的梯度是根据输入

转矩控制的转矩差值曲线作为其控制梯度。

3.2 打滑限制控制

车辆打滑是指车辆驱动轮因为路面附着力不够造成驱动轮在路面滑移或滑转的现象,即表现为驱动轮与非驱动轮(或车速)不相等的情形。由汽车理论可知,一旦打滑超过底盘车辆稳定控制程序ESP的判断阈值,ESP会请求VCU进行降低转矩来减缓或消除打滑现象^[5]。而ESP激活打滑控制一般都是车辆打滑比较严重的工况,而针对轻微或小段车速打滑的情形,从提高驾驶性和防抖的角度来看,可以根据打滑的车速差进行主动防滑^[4]降转矩控制。

根据汽车理论的整车驱动动力学平衡公式^[7]可知,车速就是驱动力连同车辆运动部件共同作用的结果。因此,为进行有效控制打滑带来的潜在影响,可以根据车辆打滑时车速差反向推导出防抖打滑控制转矩。由图8中的打滑点 $S_5(v_{S_5})$ 与 $S_4(v_{S_4})$ 点的车速差(实际软件计算取小段时间差 t_{slip} 的滚动样本车速差)计算出车辆的打滑加速度,如式(10)所示。同时,按汽车理论可计算转矩引起打滑的加速度,如式(11)所示。

$$\frac{du}{dt} = \frac{v_{S_5} - v_{S_4}}{3.6 \cdot t_{\text{slip}}} \quad (10)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{F_j}{\delta \cdot m_{\text{Car}}} \quad (11)$$

联合式(10)与式(11)可以得到车辆打滑时引起车速差的控制理论加速力 F_j ,同时考虑到控制打滑的转矩调节系数 η 可以得到最终控制打滑的目标转矩 T_{slip} ,计算如式(12)所示。

$$T_{\text{slip}} = (-1) \cdot \eta \cdot F_j \cdot r = (-1) \cdot \eta \cdot \frac{v_{S_5} - v_{S_4}}{3.6 \cdot t_{\text{slip}}} \cdot \delta \cdot m_{\text{Car}} \cdot r \quad (12)$$

3.3 转矩过0控制

电驱转矩过0控制是针对车辆在加速(Tip In)及减速(Tip Out)工况,电驱转矩由负到正或由正到负的转矩方向动态控制过程。过0控制包括转矩过0开始点的识别、过0的转矩梯度、过0结束转矩点判断以及过0后的转矩恢复到目标转矩等4个方面的内容,结合图8控制过程并针对向上过0控制4个重点目标展开分析。

3.3.1 过0开始点识别

转矩过0开始点,即过0控制标志激活时识别的电驱轮端目标转矩及电驱实际转矩,两者共同满足成为判断标志激活关键条件之一,例如向上过0时取轮端目标转矩为 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$,电驱实际转矩为 $-0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

为实现过0防抖,过0转矩的识别对过0的防抖性能起到关键的作用,其考虑到的因素如下:

(1)电驱过0开始转矩由过0间隙、过0控制的梯度、过0目标时间以及电驱转子惯量决定,其控制可以参考式(13)和式(14)的要求。

(2)电驱过0开始的轮端转矩由电驱转矩、速比以及过0前轮端目标转矩和电驱端转矩差决定,其计算值如式(15)所示。

$$T_{Em} \leq \frac{T_{C_{15}}}{\tau} = \frac{\min(T_{Jslip}, T_{Jbrk}, \frac{\int_0^\theta \zeta_{max} d\theta}{t_{sim}}) - \int_0^{t_{inc}} \zeta dt}{\tau} \quad (13)$$

$$\nabla N = N_{S_{16}} - N_{S_{15}} = \int_0^{t_{inc}} \frac{T_{Em}}{I_{Em}} dt \quad (14)$$

$$T_{C_{15}} \leq [T_{Em} \cdot \tau + (T_{W_9} - T_{C_{15}})] \quad (15)$$

针对转矩向下过0,其开始点转矩相关定义及计算与向上过0过程类似,其电驱过0开始点取值为大于式(9)计算值,在此不再详述。

3.3.2 过0的梯度控制

根据图6的防抖模块功能架构,转矩过0的梯度控制就是在过0阶段(标志激活)取轮端目标转矩与防抖过0转矩的最小值(向下过0取两者的最大值)。在具体控制过程中,过0的动态转矩梯度大小是决定防抖效果的关键,其转矩梯度越大,转矩过0时间越短但抖动越大;转矩梯度越小,转矩过0时间越长但抖动量较小。同时,转矩过0时间越长对整车动力的响应有很大的影响,因此联合式(13)、式(14)及过0强制复位时间(处于安全机制考虑)可以得到转矩过0的梯度要求,如式(16)所示。

$$\int_0^{t_{inc}} \zeta dt \leq [\min(T_{Jslip}, T_{Jbrk}, \frac{\int_0^\theta \zeta_{max} d\theta}{t_{sim}}) - \max(\int_0^{t_{inc}} \nabla N \cdot I_{Em} dt, \int_0^{t_{inc}} \nabla N \cdot I_{Em} dt) \cdot \tau] \quad (16)$$

在实际软件控制模型中,考虑到防抖软件的移值性,针对同一动力总成平台,可以计算或利用设备测试出转矩过0的最小、最大的梯度边界,不同车型匹配可以标定使用不同的调节两边界乘积因子的形式来完成过0梯度的驾驶性控制结果平台化移植。

3.3.3 过0结束点判断

转矩过0结束点一般以电驱的实际转矩作为判断主要条件具有较高的鲁棒性,该转矩是以电驱端过0后转矩换算出来的不会产生抖动(Jerk)的转矩,可以利用式(17)计算出来的轮端转矩作为参考。另

外,根据行业标定经验过0结束电驱端转矩 T_{Em} 取值为3~4 N·m左右(向上过0:3~4 N·m或向下过0:-3~-4 N·m)换算出来的转矩作为参考。

$$T_{C_{16}} \geq \max[\max(T_{Jslip}, T_{Jbrk}), \frac{\int_0^\theta \zeta_{max} d\theta}{t_{sim}}, T_{Em} \cdot \tau + (T_{W_9} - T_{C_{15}})] \quad (17)$$

3.3.4 过0后转矩恢复

转矩过0后恢复是让防抖转矩在过0后按一定的梯度恢复到防抖模块输入的电驱轮端目标转矩。理论上过0结束时,图8中 C_{17} 点的转矩应该在 C_{16} 的时间点直接复位到 W_{10} 左右的转矩值,但为了进一步保证防抖转矩的可控性及避免二次抖动,需要转矩梯度可控地恢复到目标轮端转矩 W_{10} 位置的值。一般来讲,此阶段的转矩梯度取决于过0结束时 C_{16} 位置值、 C_{16} 转矩与 W_{10} 位置目标转矩的差值以及转矩恢复的时长 t_{rec} ,同时考虑到不同车速段驾驶性的需求,可以按式(18)计算其转矩恢复梯度。

$$\zeta \geq (\frac{T_{W_{10}} - T_{C_{16}}}{t_{rec}} + \zeta_{W_{10}}) \cdot \lambda(v) \quad (18)$$

式中 $\lambda(v)$ 为基于车速的恢复可控因子,其值根据车速进行标定(车速越大因子越大),其值一般大于1。

3.4 制动协调限制控制

制动协调(Blend)控制是指制动工况电驱转矩急剧变化过程的滤波控制。其转矩从高转矩值(绝对值)减少到0转矩的变化过程中转矩变化梯度的限制控制。特别是在转矩下降或上升至0点附近时,较大的转矩变化梯度仍会造成在电驱的0转矩位置产生较大的Damping抖动(Jerk)现象。因此电驱电制动的转矩变化至0点的转矩梯度可以参考靠齿转矩梯度来实现防抖,而从大转矩梯度到0转矩点梯度可以采用转矩梯度渐变的形式控制,具体0点目标转矩及梯度计算参看式(19)及式(20),Blend开始时梯度及转矩值估算参看式(21)及式(22)。

$$T_{C_{21}} = \frac{\nabla N_{C_{21}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot I_{Em} + T_{Drift}}{60} \cdot \tau \quad (19)$$

$$\zeta_{C_{21}} = \frac{T_{C_{21}}}{\theta} \cdot t_{sim} \quad (20)$$

$$\zeta(\alpha) = \min(\zeta_{max}, \frac{\zeta_{C_{20}} - \zeta_{C_{21}}}{t_{blend}}) \cdot \lambda(T) \quad (21)$$

$$T_{C_{20}} = \int_0^{t_{blend}} \frac{(\zeta_{C_{20}} - \zeta_{C_{21}})}{t_{blend}} \cdot \zeta(\alpha) + T_{C_{21}} \quad (22)$$

式中: $\nabla N_{C_{21}}$ 为 C_{21} 点转速波动控制目标; $\zeta(\alpha)$ 为制动协调控制动态转矩梯度; t_{sim} 为程序仿真计算步长;

t_{blend} 为制动协调控制时长; $\lambda(T)$ 为基于转矩标定的因子,其值小于1。

4 仿真分析

下面以图8中的控制策略的静车状态靠齿及转矩过0两个工况为例,基于控制设计进行计算仿真分析。根据上文设计的控制策略和其控制目标的计算公式,设置表1内仿真基础定义参数作为模型控制仿真的输入并进行仿真计算。

表1 仿真计算输入参数值定义

参数名称	参数符号	单位	定义数值
整车质量	m_{Car}	kg	2 350
整车阻力系数0	F_0	N	122.1
整车阻力系数1	F_1	$N/(km \cdot h^{-1})$	1.598
整车阻力系数2	F_2	$N/(km \cdot h^{-1})^2$	0.036 3
整车等效惯量系数	δ	N/kg	1.1
轮胎滚动半径	r	m	0.366
电驱总间隙角度	θ	rad	0.017 4
电驱转子惯量	I_{Em}	$kg \cdot m^2$	0.049 14
电驱至轮端速比	τ		12.44
过0最大Jerk轮端梯度	ξ_{max}	$N \cdot m/s$	150
滑行过0允许Jerk转矩	T_{JSlip}	$N \cdot m$	50
制动过0允许Jerk转矩	T_{JBrk}	$N \cdot m$	100
靠齿控制转速波动值目标	∇N_{th}	r/min	20
靠齿动态梯度1	ζ_{C_1}	$N \cdot m/s$	150
靠齿动态梯度2	ζ_{C_2}	$N \cdot m/s$	30
靠齿动态梯度3	ζ_{C_3}	$N \cdot m/s$	80
靠齿动态梯度4	ζ_{C_4}	$N \cdot m/s$	20
转矩向下过0时间	t_{dec}	s	0.2
过0后转矩恢复时间	t_{rec}	s	0.1
转矩向上过0时间	t_{inc}	s	0.18
过0最大允许时间(复位)	t_{max}	s	0.3

考虑到简化仿真,忽略电驱的Damping控制及转矩零漂等其它因素影响,电驱完全响应HCU请求的转矩。因此根据上述的控制目标计算公式可以计算出相应目标结果,然后根据表1目标计算出整个控制过程细分阶段的控制梯度、时间值以及转矩与仿真对比,其仿真计算结果如表2所示。

通过上述的参数定义输入可以仿真出靠齿转矩控制、转矩过0的防抖目标转矩和转速的相关数据如图10和图11所示。同时,通过参数计算出相关的控制转矩、转矩梯度、时间以及转速波动的结果与仿真结果进行对比,证明了防抖设计目标参数计算能够较好地实现电驱的防抖功能。

表2 控制计算仿真参数值

起动阶段	控制参数	单位	计算值
靠齿控制	t_{C_1}	s	0.13
	t_{C_2}	s	0.23
	t_{C_3}	s	0.08
	t_{C_4}	s	0.13
向下过0控制	T_{Em}	$N \cdot m$	1.61
	$T_{C_{10}}$	$N \cdot m$	20.0
	$T_{C_{11}}$	$N \cdot m$	-261.0
	$\nabla N_{S_{11}}$	r/min	42.4
	ζ_{rec}	$N \cdot m/s$	3112
向上过0控制	T_{Em}	$N \cdot m$	-1.85
	$T_{C_{15}}$	$N \cdot m$	-23.0
	$T_{C_{16}}$	$N \cdot m$	261.0
	$\nabla N_{S_{16}}$	r/min	40.8
	ζ_{rec}	$N \cdot m/s$	3 112

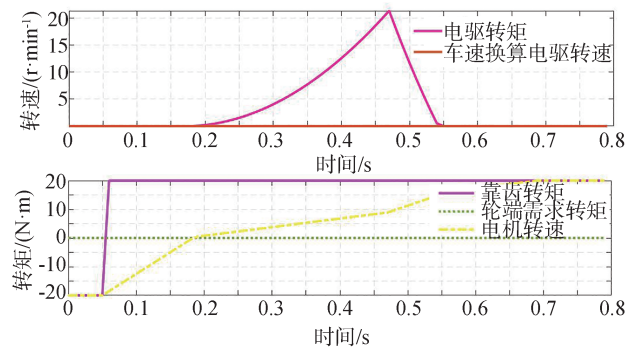


图10 靠齿控制仿真结果

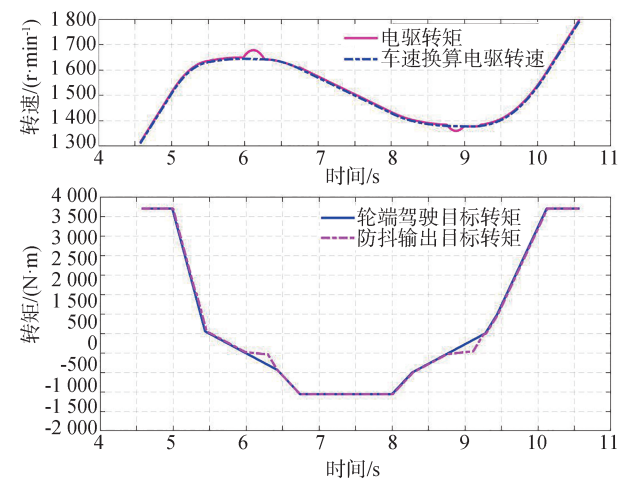


图11 转矩过0控制仿真结果

5 实车验证

将上述防抖控制设计应用到某四驱项目控制软件中。车辆通过测试和标定,分别采集静态D/R切换靠齿工况、转矩过0两种不同应用场景的防抖控制过程数据参数,具体参数定义如表3所示。

考虑到排除换挡对于防抖的附加限制或影响,现取后电驱作为控制示例目标。该防抖输入转矩由HCU转矩链功能控制并进行前后轴分配给后轮端电驱目标转矩,然后经过防抖模块(AJC)进行控制,最后向电驱控制单元(MCU)发出控制目标转矩需求。在图12中D/R切换实测靠齿数据的靠齿时间和电驱转速波动值与仿真保持了较好的统一。在图13中的电驱转矩过0实测数据中,转矩往上过0和转矩往下过0时间均控制在0.2s以内且过0时的电驱转速波动也与仿真结果保持了较好的一致性。通

表3 测试参数定义

参数名称	单位	定义
PtDistr_tqWhlEm3Req	N·m	电驱轮端目标转矩
EM3_tqEradTDp_MP	N·m	防抖控制目标转矩
EM3_tqEradTOut_MP	N·m	防抖输出目标转矩
HCU_TMRDesiredTorque	N·m	HCU请求电驱转矩
IPU3_tqMotAct	N·m	电驱3实际转矩
TMR_1	r/min	电驱3实际转速
VehV_vVehGndSpd	km/h	车速
LongitudinalAcceleration	g	整车纵向加速度
PRNDGearAct		车辆挡位
Brake_percBrkPedl	%	制动深度
AcceleratorPosRaw	%	油门深度
EM3_bLashActiveTpin_MP	bool	转矩向上过0标志
EM3_bLashActiveTpout_MP	bool	转矩向下过0标志

过两个实例证明该算法架构及策略成功实现了后电驱的防抖功能。

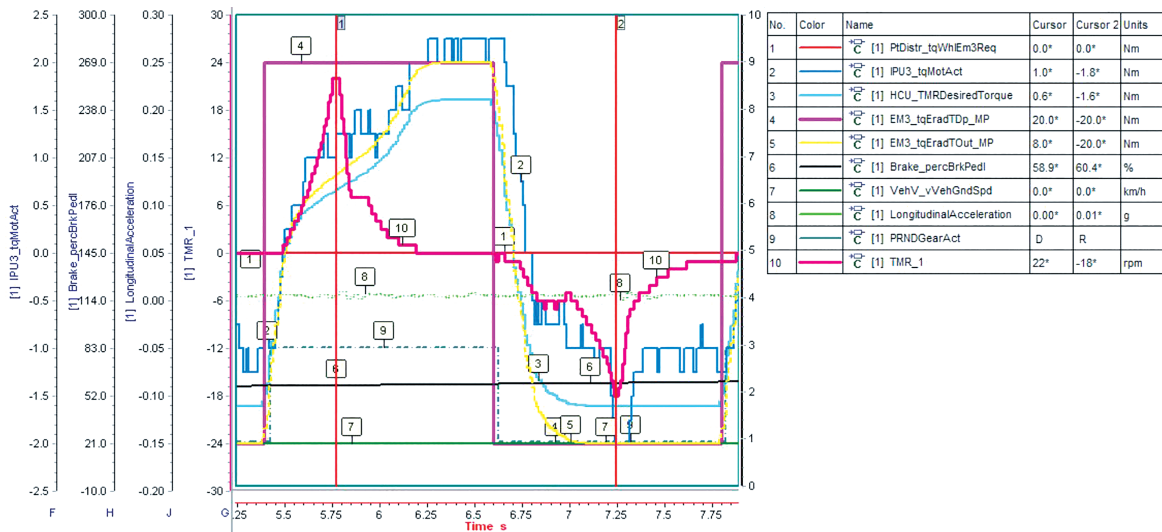


图12 D/R挡切换靠齿转矩实车数据

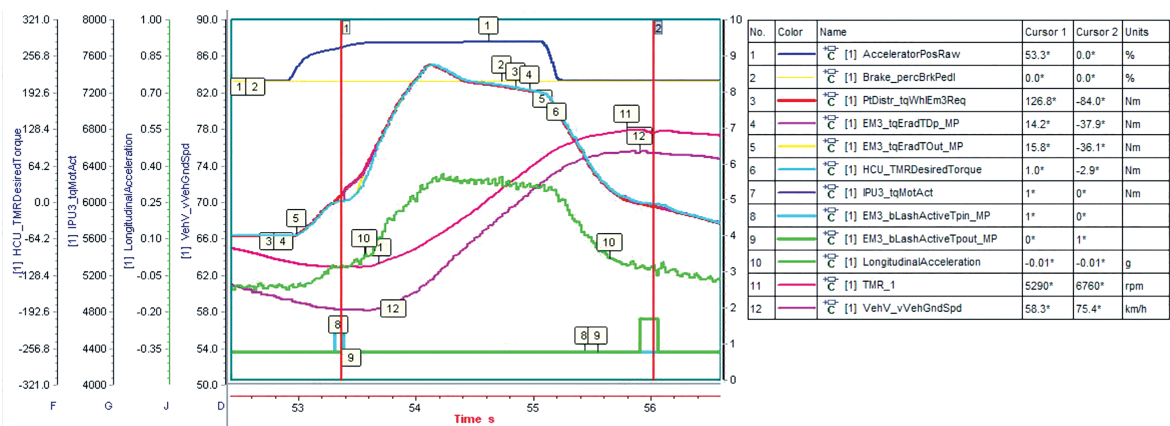


图13 电驱转矩过0实车数据

6 结论

本文从结合整车应用场景和电驱转矩过0防抖目标出发,分析了整车的各种防抖控制功能需求。根据防抖功能需求,设计出防抖的软件模块架构及控制策略,并同时给出相应控制阶段的目标计算推导,并进行了仿真分析。然后结合实际项目,将防抖控制算法应用到整车上,通过靠齿和转矩过0的实测数据表明基本达到设计的控制效果。本文通过对防抖控制理论的初步探讨、控制目标推导、仿真分析以及实车测试,证明了该控制策略不仅有效实现电驱转矩过0的防抖功能,同时根据实车测试出来的车辆加速度曲线及电驱转速波动范围可知该控制策略还保证了车辆优异的防抖性能。目前该产品应用车型已经成功上市且在驾驶性上取得了非常好的评价。另外,计算仿真和理论探讨的结果虽然对防抖软件实车的标定控制基本保持一致,但针对过0的极限梯度边界限制仍靠工程经验及测试数据来指导标定控制。而深层次地探讨电驱间隙及过0的真实抖动机理和边界获取可作为后续的基础研究,借助于CAE物理仿真及测试设备来得到准确的防抖转矩极限梯度边界。

参考文献

- [1] 魏敦烈. 基于电机波动补偿的电动车防抖控制设计[J]. 汽车零部件, 2022, 2: 39-42.
WEI Dunlei. Design of anti-shake control of pure electric vehicle based on motor speed fluctuation compensation [J]. Automobile Parts, 2022, 2: 39-42.
- [2] 纪历, 马雪晴, 陈震民. 磁悬浮高速电机转子低频振动机理及补偿方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(17): 2053-2060.
JI Li, MA Xueqing, CHEN Zhenmin. Low frequency vibration mechanism for amb high-speed motor rotor systems and its compensation strategy [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(17): 2053-2060.
- [3] 张剑锋, 叶先军. 电动化车辆主动防抖控制策略的研究[J]. 上海汽车, 2020, 10(1): 4-7.
ZHANG Jianfeng, YE Xianjun. A research on active anti jerk control strategy for electric vehicles [J]. Shanghai Auto, 2020, 10(1): 4-7.
- [4] 严周栋, 杭鹏, 陈重璞, 等. 分布式电驱装载机驱动防滑控制[J]. 汽车工程, 2023, 45(10): 1943-1953.
YAN Zhoudong, HANG Peng, CHEN Chongpu, et al. Drive anti-skid control of distributed electric drive loaderr [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(10): 1943-1953.
- [5] 赵治国, 王晨, 张彤, 等. 纯电Tip-In/Tip 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.
ZHAO Zhiguo, WANG Chen, ZHANG Tong, 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.
- [6] 余卓平, 冯源, 熊璐, 等. 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): 105-111.
YU Zhuoping, FENG Yuan, XIONG Lu, et al. Review on vehicle dynamics control of distributed drive electric vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 105-111.
- [7] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 17-19.
YU Zhisheng. Automotive theory [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2018: 17-19.
- [12] GU X, SEE K W, LI P, et al. A novel state-of-health estimation for the lithium-ion battery using a convolutional neural network and transformer model[J]. Energy, 2023, 262: 125501.
- [13] XIANG F, ZHANG Y, ZHANG S, et al. Bayesian gated-transformer model for risk-aware prediction of aero-engine remaining useful life [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 121859.
- [14] JIN R, CHEN Z, WU K, et al. Bi-LSTM-based two-stream network for machine remaining useful life prediction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-10.
- [15] GAO H, LI Y, ZHAO Y, et al. Dual channel feature attention-based approach for RUL prediction considering the spatiotemporal difference of multisensor data [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(8): 8514-8525.
- [16] ZHANG Z, SONG W, LI Q. Dual-aspect self-attention based on transformer for remaining useful life prediction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.
- [17] HOSSAIN S, UMER S, ROUTH K, et al. Fine-grained image analysis for facial expression recognition using deep convolutional neural networks with bilinear pooling[J]. Applied Soft Computing, 2023, 134: 109997.
- [18] WANG D, WANG J, REN Z, et al. DHBP: a dual-stream hierarchical bilinear pooling model for plant disease multi-task classification [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195: 106788.
- [19] JIN Y, HOU L, CHEN Y. A time series transformer based method for the rotating machinery fault diagnosis [J]. Neurocomputing, 2022, 494: 379-395.

(上接第300页)