

电动汽车扭矩滤波控制策略研究

王坤俊, 欧阳智, 卢雄, 文健峰, 杨杰君

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:本文提出一种电动汽车扭矩滤波控制方法,既能快速响应驾驶员扭矩请求,又能降低驱动工况与制动工况相互切换时减速器齿轮啮合时带来的冲击和噪声,以提高车辆舒适性,并进行实车验证。

关键词:电动汽车; 扭矩滤波; 控制策略

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)06-0010-04

Research on Torque Filtering Control Strategy for Electric Vehicles

WANG Kunjun, OUYANG Zhi, LU Xiong, WEN Jianfeng, YANG Jiejun

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

Abstract: The authors propose a torque filtering control method for electric vehicles and conduct the vehicle verification, which can quickly respond to driver torque requests and reduce the impact and noise caused by the reducer gear meshing when the driving and braking conditions switch to each other in order to improve the vehicle comfort.

Key words: electric vehicles; torque filtering; control strategy

扭矩控制作为电动汽车整车控制的重要组成部分,对整车的动力性和经济性有着重要影响^[1-3]。扭矩滤波在扭矩控制中发挥着至关重要的作用,既要快速响应驾驶员扭矩请求,又要保证扭矩变化平滑^[4-5]。扭矩由电机经过与之匹配的减速器降速增扭后传递到车轮,当驱动工况与制动工况相互切换时,减速器齿轮传动的啮合面会发生变化,由于齿轮间隙的存在,主动轮会经过一个短暂的加速,然后撞击到啮合面,从而产生较大的冲击和噪声,甚至造成车辆抖动^[6-7]。

本文提出一种扭矩滤波控制方法,既能迅速响应驾驶员在各种操作工况下的需求扭矩,保证车辆动力性,又能在车辆驱动工况与制动工况相互切换时,有

效降低减速器齿轮间隙带来的打齿冲击和噪声,从而提升驾驶舒适性。

1 扭矩滤波控制策略

1.1 系统架构

电动汽车通常将整车控制器作为整车扭矩控制的核心^[8-9],整车控制器采集挡位、加速踏板、制动踏板等硬线输入信号,接收电机控制器反馈扭矩、转速信息,识别驾驶员操作意图,计算驾驶员需求扭矩,经过扭矩滤波处理后得出电机目标扭矩,再由电机控制器实现该目标扭矩的响应,从而实现车辆扭矩控制^[10]。扭矩滤波主要包括扭矩上升率限制、扭矩下降率限制、扭矩过零处理,以控制扭矩变化的快慢。

收稿日期:2023-07-17。

第一作者:王坤俊(1981—),男,高级工程师;主要从事新能源汽车电控系统开发与控制系统集成工作。E-mail:wangkunjun.cy@crrecg.cc。

通讯作者:欧阳智(1994—),男,工程师;主要从事新能源汽车整车控制策略开发与辅助驾驶控制策略开发工作。E-mail:1529524599@qq.com。

系统架构如图1所示。

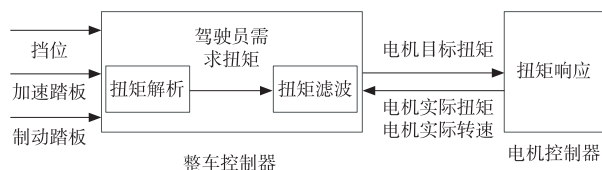


图1 系统架构

1.2 扭矩上升率限制

当驾驶员需求扭矩大于电机目标扭矩时,表明有加大车辆驱动扭矩或减小车辆制动扭矩的意图。为保证扭矩变化平滑,需要限制扭矩上升率。分为以下几种工况限制:

1) 电机目标扭矩为正(驱动扭矩),且蠕行功能触发。驾驶意图为加大蠕行驱动扭矩,扭矩上升率为蠕行扭矩上升率,此上升率通常为一个较小的定值,可确保车辆平稳缓慢行驶。

$$K_R = C_{C1}$$

式中: K_R 为扭矩上升率; C_{C1} 为蠕行扭矩上升率常数,本文取值 $300 \text{ N}\cdot\text{m/s}$ 。

2) 电机目标扭矩为正(驱动扭矩),且蠕行功能未触发。驾驶意图为加大踏板驱动扭矩,扭矩上升率为踏板驱动扭矩上升率,此上升率跟驾驶员需求扭矩与电机目标扭矩的差值、电机转速有关。驾驶员需求扭矩与电机目标扭矩的差值越大,上升率越大,以快速响应驾驶员扭矩请求;电机低转速时上升率较小,可确保车辆平稳起步,电机转速较高后,加大上升率,提高车辆动力性。由于无法用数学表达式描述,本文通过 T_D 和 n 二维查表得到踏板驱动扭矩上升率,根据实车标定情况调整,具体数值见表1。

表1 踏板驱动扭矩上升率

$T_D / \text{N}\cdot\text{m}$	$K_R / (\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$				
	$n = 0 \text{ r/min}$	$n = 500 \text{ r/min}$	$n = 1000 \text{ r/min}$	$n = 2000 \text{ r/min}$	$n = 3000 \text{ r/min}$
0	200	300	400	500	600
500	300	500	600	800	900
1000	400	800	900	1000	1200
2000	500	1000	1200	1300	1400
3000	600	1200	1400	1500	1600

$$K_R = f(T_D, n)$$

式中: T_D 为驾驶员需求扭矩与电机目标扭矩的差值; n 为电机转速。

3) 电机目标扭矩为负(制动扭矩),且驾驶员需求扭矩为负(制动扭矩)。驾驶意图为减小制动扭矩,制动扭矩的数值实际上需要减小,扭矩上升率为制动扭矩上升率。此上升率根据驾驶员需求扭矩与电机目标扭矩的差值得出,驾驶员需求扭矩与电机目标扭矩的差值越大,上升率越大。

$$K_R = \max(K_{\min1}, f_1 \cdot T_D)$$

式中: $K_{\min1}$ 为最小制动扭矩上升率,本文取值为 $1200 \text{ N}\cdot\text{m/s}$; f_1 为制动扭矩上升率系数,本文取值5。

4) 电机目标扭矩为负(制动扭矩),且驾驶员需求扭矩为正(驱动扭矩)。驾驶意图为从制动工况切换到驱动工况,扭矩上升率为制动转驱动扭矩上升率。设置一个齿轮啮合区间 $[-T_{m1}, T_{m1}]$,当电机目标扭矩 $T_T < -T_{m1}$ 时,处于卸载制动扭矩阶段,扭矩上升率跟制动扭矩上升率保持一致,迅速卸载制动扭矩;当电机目标扭矩 $T_T \in [-T_{m1}, T_{m1}]$ 时,设置较小的扭矩上升率使齿轮缓慢啮合,减小齿轮冲击和噪声;当电机目标扭矩 $T_T > T_{m1}$ 时,处于增大驱动扭矩阶段,扭矩上升率跟踏板驱动扭矩上升率保持一致,迅速增大驱动扭矩。

$$\begin{cases} K_R = \max(K_{\min1}, f_1 \cdot T_D), & T_T < -T_{m1} \\ K_R = C_{m1}, & T_T \in [-T_{m1}, T_{m1}] \\ K_R = f(T_D, n), & T_T > T_{m1} \end{cases}$$

式中: T_{m1} 为减速器齿轮驱动转制制动啮合扭矩,表示啮合面即将发生变化,本文取值 $80 \text{ N}\cdot\text{m}$; C_{m1} 为制动转驱动工况齿轮啮合扭矩上升率常数,本文取值 $240 \text{ N}\cdot\text{m/s}$ 。

1.3 扭矩下降率限制

当驾驶员需求扭矩小于电机目标扭矩时,表明有减小车辆驱动扭矩或加大车辆制动扭矩的意图,为保证扭矩平滑变化,需要限制扭矩下降率。具体分析过程跟扭矩上升率限制类似:

1) 蠕行驱动扭矩下降率:

$$K_F = C_{C2}$$

式中: K_F 为扭矩下降率; C_{C2} 为蠕行扭矩下降率常数,

本文取值为 $500 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{s}$ 。

2) 踏板驱动扭矩下降率根据扭矩差值和电机转速二维查表得出,具体数值见表2。

表2 踏板制动扭矩下降率

$T_D/$ $\text{N}\cdot\text{m}$	$K_F/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$				
	$n =$ 0 r/min	$n =$ 500 r/min	$n =$ 1 000 r/min	$n =$ 2 000 r/min	$n =$ 3 000 r/min
0	300	400	500	600	800
500	500	600	800	1 200	1 600
1 000	800	1 200	1 600	1 800	2 000
2 000	1 000	1 600	2 000	2 200	2 400
3 000	1 200	1 800	2 400	2 600	2 800

$$K_F = f(T_D, n)$$

3) 制动扭矩下降率:

$$K_F = \max(K_{\min 2}, f_2 \cdot T_D)$$

式中: $K_{\min 2}$ 为最小制动扭矩下降率,本文取值为 $800 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{s}$ 。

4) 驱动转制动扭矩下降率:

$$\begin{cases} K_F = \max(K_{\min 2}, f_2 \cdot T_D), & T_T < -T_{m2} \\ K_F = C_{m2}, & T_T \in [-T_{m2}, T_{m2}] \\ K_F = f(T_D, n), & T_T > T_{m2} \end{cases}$$

式中: f_2 为制动扭矩下降率系数,本文取值4; T_{m2} 为减速器齿轮制动转驱动啮合扭矩,本文取值 $80 \text{ N}\cdot\text{m}$; C_{m2} 为驱动转制动工况齿轮啮合扭矩下降率常数,本文取值 $240 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{s}$; $[-T_{m2}, T_{m2}]$ 为驱动转制动工况齿轮啮合区间。

1.4 扭矩过零处理

经过扭矩上升率限制、扭矩下降率限制处理后,存在由负扭矩直接切换到正扭矩、由正扭矩直接切换到负扭矩的情形。驱动扭矩、制动扭矩如果不经处理直接切换,会对减速器产生较大的齿轮冲击,从而影响舒适性。为此,本文设计了一种扭矩过零处理方法:检测到由负扭矩切换到正扭矩、由正扭矩切换到负扭矩的情形时,输出最终滤波扭矩为0,确保驱动、制动工况相互切换时短暂地输出 40 ms 零扭矩,以减小齿轮冲击。

2 实车测试

为验证上述扭矩滤波方法的实际效果,选取一辆 10 m 纯电动客车测试驱动、制动、制动转驱动、驱动转制动等工况下经过扭矩滤波后的电机目标扭矩情况。

1) 驱动、驱动转制动工况测试结果如图2所示。踩加速踏板起步行驶,经过扭矩滤波处理后的电机目标扭矩平稳上升,确保车辆平稳运行;随后踩制动踏板制动,对应的原始扭矩由正到负,经过扭矩滤波处理后,电机目标扭矩经历驱动扭矩平稳下降、齿轮啮合驱动扭矩缓慢下降、扭矩过零、齿轮啮合制动扭矩缓慢上升、制动扭矩平稳上升5个阶段,有效降低了减速器齿轮冲击和噪声。

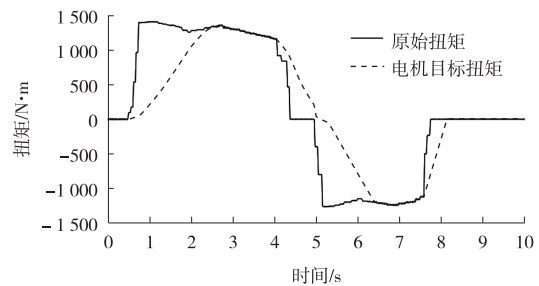


图2 驱动转制动工况扭矩曲线

2) 制动、制动转驱动工况测试结果如图3所示。行驶过程中踩制动踏板制动,对应的原始扭矩瞬间达到一个较大的负值,经过扭矩滤波处理后电机目标扭矩平稳下降至目标值;随后踩加速踏板驱动,对应的原始扭矩由负到正,经过扭矩滤波处理后,电机目标扭矩经历制动扭矩平稳下降、齿轮啮合制动扭矩缓慢下降、扭矩过零、齿轮啮合驱动扭矩缓慢上升、驱动扭矩平稳上升5个阶段,有效降低了减速器齿轮冲击和噪声。

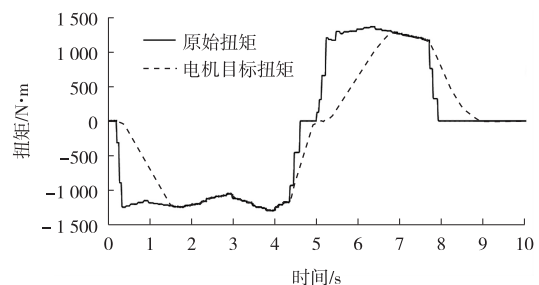


图3 制动转驱动工况扭矩曲线

3 结束语

本文提出了一种扭矩滤波控制方法,不仅可以快速响应驾驶员扭矩请求,而且在车辆驱动工况与制动工况相互切换时,通过降低扭矩上升率和下降率、扭矩过零处理,确保了扭矩平稳变化,可以有效降低减速器齿轮间隙带来的打齿冲击和噪声,从而提高了驾驶舒适性。

参考文献:

- [1] 陈龙,程伟,徐兴,等. 基于模糊控制的纯电动汽车加速输出转矩优化控制策略[J]. 汽车技术,2015(4):56-61.
- [2] 张传正. 基于驾驶意图识别的纯电动汽车整车控制策略研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [3] 李晓东. 基于驾驶意图识别的纯电动汽车驱动控制策略研究[D]. 长春:长春工业大学,2018.
- [4] 代长远. 纯电动汽车整车控制策略开发与优化[D]. 长沙:湖南大学,2020.
- [5] 莫旭辉,朱园园,杨辉. 电动汽车坡道起步电机转速控制研究[J]. 计算机仿真,2018,35(4):107-111.
- [6] 张立军,郑鹏,孟德建,等. 混合动力轿车纯电模式起步时纵向抖振的试验研究与控制[J]. 汽车工程,2013,35(3):212-218.
- [7] 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.
- [8] 夏草盛. 纯电动汽车加速过程中的驱动转矩优化控制策略[J]. 黑龙江科学,2019,10(16):84-85.
- [9] 王丽娟. 纯电动客车整车控制系统设计及驱动控制策略研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [10] 万海桐. 纯电动汽车整车驱动控制策略研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

◆ 广告目次

招商局检测车辆技术研究院有限公司	(封面)	公益广告	(前插三)
宇通客车股份有限公司	(封二)	比亚迪汽车工业有限公司	(前插四)
《客车技术与研究》理事会名录	(封三)	中车时代电动汽车股份有限公司	(后插一)
期刊信息	(封底)	厦门金龙联合汽车工业有限公司	(后插二)
中通客车股份有限公司	(前插一)	成都客车股份有限公司	(后插三)
北京福田欧辉新能源汽车有限公司	(前插二)	公益广告	(后插四)