

电动车 I-AMT 挡位切换电机-离合器协同控制

王奕斐¹, 姜震宇¹, 陈静¹, 洪金龙², 高炳钊³

(1. 同济大学 上海自主智能无人系统科学中心, 上海, 200092; 2. 同济大学 汽车学院机械工程博士后流动站, 上海 201804;
3. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

摘要: 纯电动汽车匹配两挡变速箱能够改善整车动力性和经济性, 由于其具有结构精简和无动力中断的优越性, 因此高挡位摩擦离合器与低挡位单向离合器组合的传动构型成为电动汽车两挡变速器的主流方案。然而, 车辆在倒挡行驶时, 需要挂入牙嵌离合器才能克服单向离合器只能传递单方向扭矩的问题。本文以一款基于牙嵌式离合器的新型无动力中断两挡自动变速器(I-AMT)为研究对象, 协同控制驱动电机和倒挡执行机构电机使牙嵌式离合器平稳快速结合。针对驱动电机系统响应延时问题, 使用史密斯预估器算法对控制系统进行预估补偿, 并通过实验对控制策略进行验证。结果表明, 该控制策略可有效避免牙嵌式离合器挂入时的冲击, 保证了变速器可在短时间内在各个挡位之间平顺切换。

关键词: 纯电动汽车; 离合器后置式自动变速器; 牙嵌式离合器; 协同控制; 史密斯预估器

中图分类号: U461

文献标志码: A

Motor-Clutch Cooperative Control During Gear Shift Process for I-AMT of Electric Vehicle

WANG Yifei¹, JIANG Zhenyu¹, CHEN Jing¹,
HONG Jinlong², GAO Bingzhao³

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. Postdoctoral Station of Mechanical Engineering, School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. New Energy Vehicle Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Pure electric vehicle equipped with two-speed gearbox has a better drivability and economy performance. Due to the simplified structure and no torque interruption during the gear shift process, the configuration that combines friction clutch for high gear and one-way clutch for low gear has become the mainstream scheme of two gear transmission of electric vehicles. However, when the vehicle is driving in reverse

gear, the dog clutch should be engaged to overcome the problem that the one-way clutch can only transmit torque in one direction. A novel two-speed automatic transmission (I-AMT) without power interruption based on dog clutch is taken as the research object, and the synergistic control of power motor and reversing actuator motor make the dog clutch act smoothly and quickly. To address the response delay problem of the power motor, the Smith estimator algorithm is used to estimate and compensate the control system. The control strategy is verified by experiments, and the results show that the control strategy can effectively avoid the vehicle jerk when the jaw clutch is engaged, which ensures the smooth gear shift of the transmission in a short time.

Key words: pure electric vehicle; inverse automatic mechanical transmission; dog clutch; cooperative control; Smith predictor

采用两挡自动变速器(I-AMT)可显著提高纯电动汽车的动力性和经济性^[1-2]。在起步爬坡等需要大力矩的工况时, 两挡变速器的动力传递路线为大传动比动力路线, 车辆起步更快, 爬坡能力更强; 当车辆高速行驶时, 动力传递路线转换到小传动比动力路线, 驱动电机效率提高、续航里程提高、最高车速增大。为了兼顾高效率与高平顺性, 采用超越离合器+摩擦离合器的两挡变速箱构型方案引起广泛关注^[3-4]。这种构型通过高挡位摩擦离合器与低挡位单向离合器之间的切换, 来实现无动力中断的换挡过程。电动汽车的 I-AMT 即基于这种原理, 在高挡位传递路线中安装一个后置摩擦离合器, 进行换挡过程的动力补偿^[5-6]。由于结构精简效率高, I-AMT 引起国际关注, 被列为电动汽车最有前景的变速传动方案之一^[7-8]。这种新型电动汽车自动变速器需要解决车辆倒挡行驶时, 超越离合器无法传递反向力矩

收稿日期: 2022-10-20

第一作者: 王奕斐(1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为车辆动力学。E-mail: yifeiwang_gs@tongji.edu.cn

算,进而求出预估环节的传递函数表达式。这样史密斯预估器就成功地将延时环节从闭环系统中移了出来,做到了反馈结果和无延时一致。补偿之后控制及时,系统的稳定性提高,系统整体性能得到了改善^[10]。

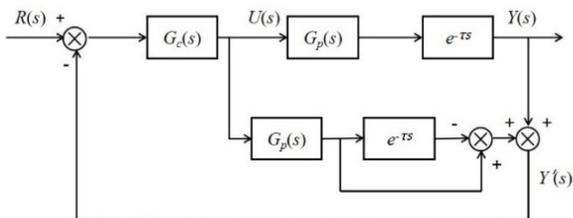


图2 考虑异步电机响应延迟的Smith预估控制系统
Fig.2 Smith predictive control system considering response delay of induction motor

史密斯预估器的传递函数为

$$G_s(s) = G_p(s)(1 - e^{-\tau s}) \quad (1)$$

式中: $G_p(s)$ 为控制过程模型; τ 为延时时间。

如此,系统在给定参考值 $R(s)$ 作用下的闭环传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} e^{-\tau s} \quad (2)$$

式中: $G_c(s)$ 为控制器模型。

由式(4)可以看出,系统的特征方程中已经不包含 $e^{-\tau s}$ 项,也就是说已经消除了纯滞后对系统控制品质的影响,而闭环传递函数分子上的 $e^{-\tau s}$ 说明被调量 $y(t)$ 的响应延迟 τ 时间^[11]。

2.2 电机模型辨识

在史密斯预估器中,需要被控对象准确的数学模型,才能得到准确的预估模型。因异步电机响应存在延迟,并且电机启动过程数学模型较为复杂,精确推导较为困难,本文采用离线系统辨识方法来确定系统的数学模型。本文采用时域法进行系统参数辨识,如图3所示,使用矩形脉冲响应离线辨识法,将矩形脉冲形式的电机指令作为输入、驱动电机编码器脉冲作为输出,通过实验测得驱动电机系统的输入和输出信号,再通过Matlab系统辨识工具箱辨识电机指令 $u(t)$ 和驱动电机编码器脉冲 $y(t)$ 之间的数学模型,得出被控对象系统的传递函数。被控对象系统的传递函数表示为:

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (3)$$

利用系统辨识工具箱,经过多组数据验证之后,得出极点数等于3,零点数为2,延时系数为12时,

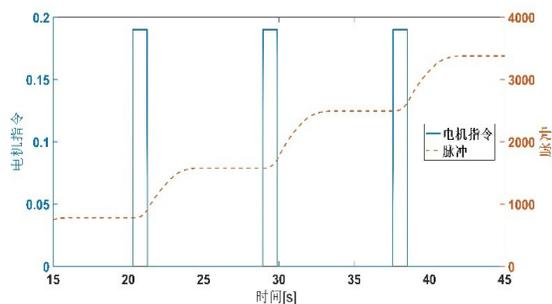


图3 驱动电机输入输出关系

Fig.3 Input and output relationship of drive motor

匹配度最高为95.22%,模型参数辨识结果为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.007927s^2 + 0.02518s + 0.004818}{s^3 - 2.982s^2 + 2.964s - 0.982} e^{-12s} \quad (4)$$

2.3 协同控制策略

在挂入倒挡时,倒挡控制逻辑如图4所示。TCU发指令给驱动电机控制器,驱动电机控制器在牙嵌离合器结合过程中不响应驾驶员油门输入,先控制倒挡执行电机将齿套挂入。通过检测位置传感器进行齿套位置判断:如传感器值在一挡大齿轮端面位置,则说明齿槽齿牙没有对上,需要控制驱动电机转动一个角度,当齿槽露出时,再次尝试挂入齿套;当传感器值在起点到一挡大齿端面之间或者一挡大齿端面到终点之间时,说明机械机构发生卡滞,或齿槽齿牙侧壁发生碰撞摩擦,需要增大倒挡执行机构电机PWM值或者回到起点重新挂入。

3 试验结果

将I-AMT样件搭载到某电动车型上进行实验,如图5所示。实验工况为:驾驶员停车状态挂入倒挡,并立即踩加速器踏板,这样能够真实的反映实际驾驶习惯。实验时对比常规PID控制器和史密斯预估器的控制效果,实验结果如图6所示。

图6(b)中,PID控制结果中电机响应滞后,误差逐渐变大,没有补偿作用,导致电机指令值较大,而且“减速”时间晚,最后齿槽和齿牙相撞,所以B点到C点之间由于齿牙与齿槽侧壁摩擦力的存在,齿套挂入困难,而且最终齿套的位移仅仅满足结合的最小位移,效果不理想。图6(b)中一挡大齿最大转速达到了约50 r/min,结合过程中车身抖动明显,正向最大冲击度为7.86 m/s³,负向最大冲击度为-4.7 m/s³,结合时间为0.85 s。

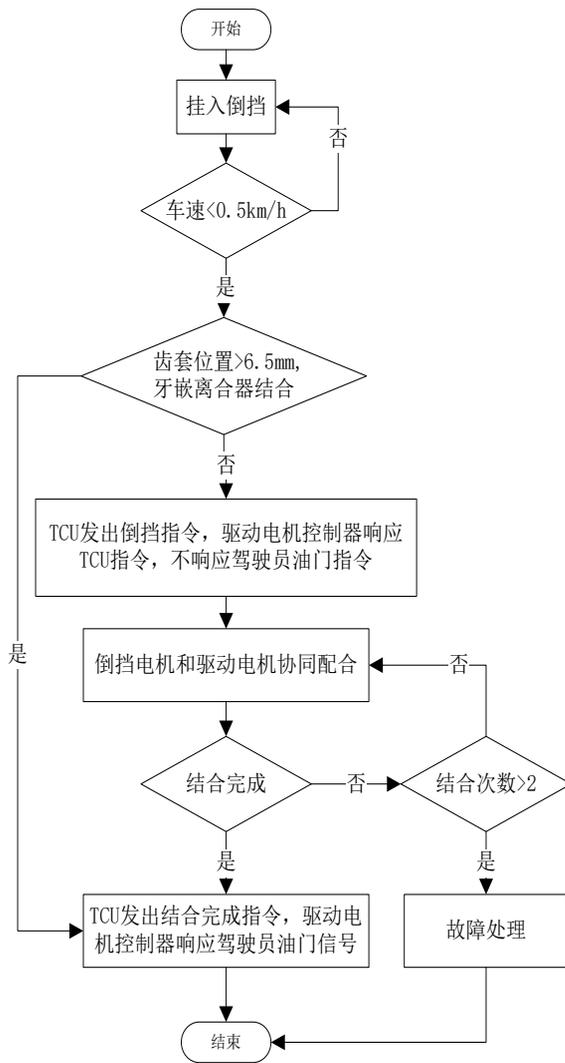


图4 倒挡控制策略

Fig.4 Reverse gear control strategy



图5 I-AMT 样机及试验车辆

Fig.5 I-AMT prototype and experimental vehicle

图6的左图中,由于史密斯预估器的作用反馈回控制器的脉冲值是经过补偿之后的结果,因此可以提前“减速”,防止电机转动过大角度,整个过程结合时间为0.7 s,一档大齿结合过程中最大转速约为20 r/min,结合过程中感受不到车身抖动,冲击度小于3 m/s³。

4 结语

本文针对电动汽车 I-AMT 自动变速器,提出了牙嵌式离合器的倒挡解决方案,并且设计了基于史密斯预估器的牙嵌离合器和驱动电机的高精度协同控制方法,解决了驱动电机系统响应延迟带来的换挡冲击问题,在保留机械式变速器高效率优势的同时,大幅提升了其平顺性能。

参考文献:

- [1] GAO B Z, LIANG Q, XIANG Y, *et al.* Gear ratio optimization and shift control of 2-speed I-AMT in electric vehicle [D]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 50/51: 615.
- [2] SORNIOTTI A, PILONE G L, VIOTTO F, *et al.* A novel seamless 2-speed transmission system for electric vehicles: principles and simulation results [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2011, 4(2): 2671.
- [3] XU X, DONG P, LIU Y, *et al.* Progress in automotive transmission technology [J]. *Automotive Innovation*, 2018, 1(3): 187.
- [4] CAVALLINO C. Two-speed transmission for electric vehicles: US 20110079097[P] 2011-04-07.
- [5] LIANG Q, GAO B Z, CHEN H. Gear shifting control for pure electric vehicle with Inverse-AMT [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 190/191: 1286.
- [6] 梁琼,任丽娜,赵海艳,等. 带2挡 I-AMT 纯电动汽车的换挡控制 [J]. *汽车工程*: 2013, 35(11): 1000.
- LIANG Qiong, REN Lina, ZHAO Haiyan, *et al.* Gear shifting control of battery electric vehicle with 2-speed I-AMT [J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(11): 1000.
- [7] AHSSAN M R, EKTESABI M M, GORJI S A. Electric vehicle with multi-speed transmission: a review on performances and complexities [J]. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2018, 7(2): 169.
- [8] MACHADO F A, KOLLMAYER P J, BARROSO D G, *et al.* Multi-speed gearboxes for battery electric vehicles: current status and future trends [J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2021, 2: 419.
- [9] LIU Z G, WU Y Q. Universal strategies to explicit adaptive control of nonlinear time-delay systems with different structures [J]. *Automatica*, 2018, 89: 151.
- [10] 张全庄,兰羽. Smith 预估器在大延迟系统中的应用 [J]. *机床与液压*: 2006(4):170.
- ZHANG Quanzhuang, LAN Yu. Application of Smith predictor in large time-delay system [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006(4): 170.
- [11] TORRICO B C, PEREIRA R D O, SOMBRA A K R, *et al.* Simplified filtered Smith predictor for high-order dead-time processes [J]. *ISA Transactions*, 2020, 109: 11.

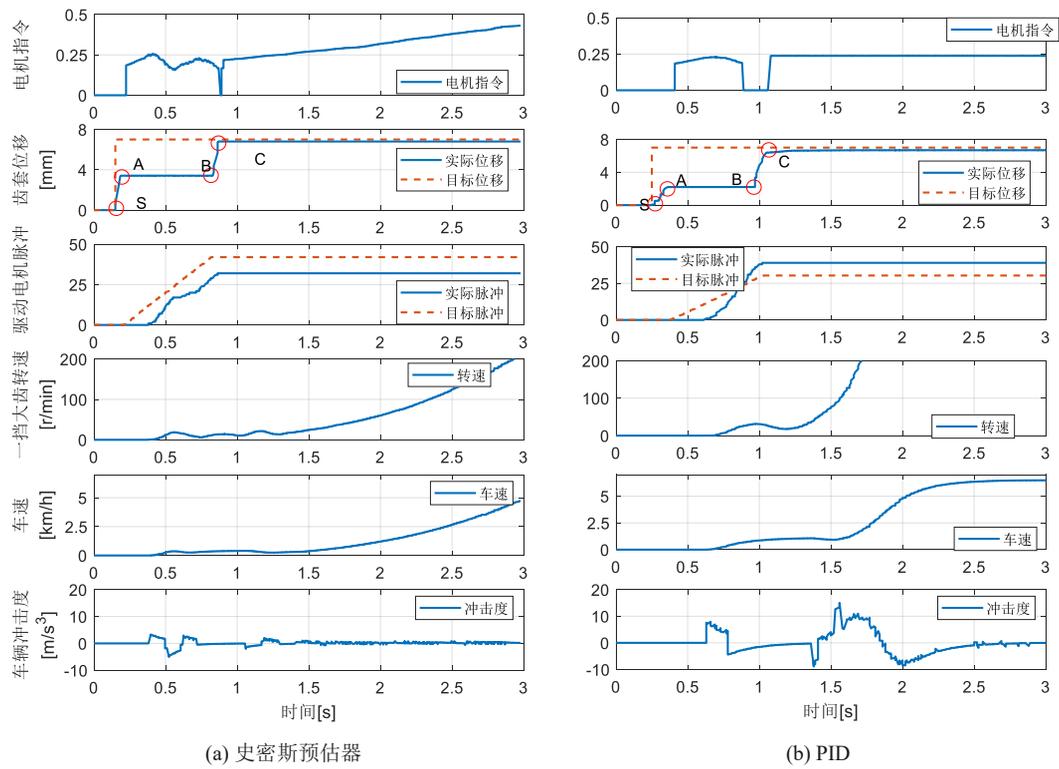


图6 挂倒挡工况试验结果

Fig.6 Experimental results in reverse gear condition