

电动汽车两挡 I-AMT 离合器半结合点 自学习算法研究

张超^{1,2}, 翟宇¹, 洪金龙^{1,3}, 高炳钊¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 青岛莱吉传动系统科技有限公司, 山东 青岛 266622;
3. 同济大学机械工程博士后站, 上海 201804)

摘要: 两挡电控机械自动变速器 (automatic mechanical transmission, AMT) 可以优化电动汽车的驱动电机工作区间, 改善整车的动力性和经济性, 但在工作过程中, 离合器的半结合点准确辨识对换挡性能影响很大。当离合器摩擦片磨损或膜片弹簧疲劳状态下, 离合器实际工作位置发生偏移, 需要通过自学习方式准确辨识离合器半结合点位置, 以保证变速器高质量换挡控制性能。以一种新型的电动汽车无动力中断两挡变速器 I-AMT (Inverse AMT) 为研究对象, 针对其干式离合器磨损后半结合点位置发生变化等问题, 提出一种离合器半结合点位置自学习策略, 使得在离合器缓慢分离的同时, 通过检测与离合器主动端相连的驱动电机转速编码器变化趋势, 实现离合器半结合点位置准确辨识。试验表明, 在离合器存在磨损的情况下, 该策略能够准确识别离合器半结合点位置, 从而自适应调整变速器工作状态, 以保证 I-AMT 高质量无动力中断换挡。

关键词: 电动汽车; 无动力中断两挡变速器; 离合器半结合点; 自学习算法

中图分类号: U463.2

文献标志码: A

Self-Learning Control Strategy for Two-Speed I-AMT Clutch Kiss-Point Identification of Electric Vehicles

ZHANG Chao^{1,2}, ZHAI Yu¹, HONG Jinlong^{1,3},
GAO Bingzhao¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Qingdao Legee Transmission System Technology Co., Ltd., Qingdao 266622, Shandong, China; 3. Postdoctoral Station of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Two gear AMT (automatic mechanical transmission) can optimize the working range of drive motor and thus improve the drivability and economy of

the electric vehicles. However, in the working process, the accurate identification of clutch kiss-point has a great impact on the gear shift performance. Once the clutch friction plate is worn or the diaphragm spring is tired, the actual working position of the clutch may offset correspondingly. Therefore, it is necessary to identify the position of the clutch kiss-point accurately through self-learning so as to ensure the high-quality shift control performance of the transmission. This paper takes a new type of non-torque interruption two-speed transmission I-AMT (Inverse AMT) of electric vehicle as the research object, aiming at the problems such as the change of the position of the clutch kiss-point after the wear, a self-learning strategy for the position identification is proposed. When the clutch is slowly separated, the accurate position identification of the clutch half joint point is realized, by detecting the change trend of the speed encoder of the driving motor connected to the clutch driving plate. The test shows that under the scenario that the clutch is worn, the proposed strategy can accurately identify the position of the clutch kiss-point so as to adaptively adjust the working state of the transmission, thus ensuring the high-quality non-power interruption shift of I-AMT.

Key words: electric vehicle; inverse automatic mechanical transmission (I-AMT); clutch kiss point; self-learning

纯电动汽车具备效率高、动力性强及经济性好等优势, 近年来备受瞩目^[1-2]。目前, 市场上多数纯电动汽车均配备单级齿轮减速器, 然而随着社会对于纯电动汽车动力、经济、舒适等综合性能的需求提升, 配备两挡或多挡变速器越来越成为电动汽车未

收稿日期: 2021-09-10

基金项目: 吉林省中青年科技创新领军人才及团队基金(20200301011RQ); 国家自然科学基金青年基金(61803173, 62003244)

第一作者: 张超(1993—), 男, 工学博士, 主要研究方向为汽车传动系统理论与控制。E-mail: clutchchao@boatran.com

通信作者: 洪金龙(1990—), 男, 博士后, 工学博士, 主要研究方向为车辆预测节能控制。E-mail: hongjl@tongji.edu.cn

来发展的趋势。为此,科研机构 and 汽车厂商开发出了多种两挡或多挡变速器^[3-4],以进一步挖掘电动汽车驱动优势。岳汉奇等人^[5]提出了一种新型的两挡机械式自动变速器(I-AMT),其在高挡位传递路线中安装一个后置离合器,进行换挡过程的动力补偿^[6-8],通过高挡位摩擦离合器与低挡位单向离合器之间的切换,实现无动力中断的换挡过程,由此可改善换挡品质。在离合器传递的力矩大于阻力矩,车速或变速箱输入轴转速由零突变时离合器的位置称为离合器半结合点,但在长时间行驶,离合器发生磨损后,离合器的行程变大,半结合点位置发生变化^[9],若继续按照之前标定值进行换挡控制则无法彻底分离离合器,造成离合器在一挡状态下持续工作在滑摩状态,加速离合器磨损,降低了换挡质量,并且对变速箱造成严重损害。

本文设计了一种离合器半结合点的自学习算法,在离合器发生磨损后,通过检测与离合器主动端相连的驱动电机转速编码器变化趋势,实现离合器半结合点位置准确辨识。本文首先对I-AMT结构进行介绍,并详细描述换挡过程摩擦式离合器半结

合点变化等问题;然后介绍提出的自学习控制策略并应用于I-AMT;最后进行测试验证。测试结果显示,本文所采用的控制系统能够精确辨识I-AMT离合器半结合点,从而保证换挡综合性能。

1 控制问题描述

I-AMT的基本结构如图1a所示,工作状态如图1b所示。一挡时,摩擦片式离合器分离,超越离合器内滚柱被压紧于楔形空间,使得内外圈转速同步,即可传递动力;二挡时,摩擦片式离合器结合,由于二挡齿轮组传动比小,因此安装在二轴上的超越离合器内圈转速大于外圈,滚柱处于空转状态从而实现“转速超越”,因此动力能从二挡路线传递;倒挡时,摩擦片式离合器分离,牙嵌式离合器与一挡从动齿轮结合。超越离合器外圈逆时针旋转,由于滚柱处于右端大空间,动力无法通过超越离合器外圈传递到内圈,而通过牙嵌式离合器结合可以传递到二轴,从而实现倒挡过程。

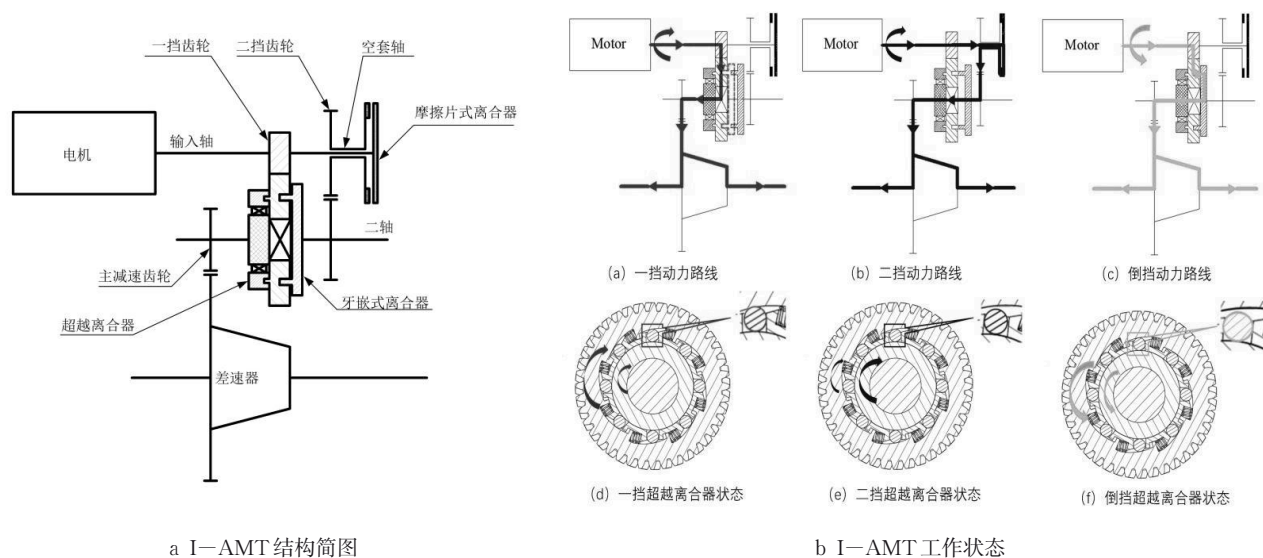


图1 I-AMT结构及工作状态

Fig.1 Architecture and working conditions of I-AMT

I-AMT离合器及执行机构结构如图2所示。汽车长期使用会使离合器顶杆以及摩擦片产生磨损:顶杆磨损变短使顶杆与压头的间隙增加,执行器动作行程需求增大;摩擦片变薄使膜片弹簧翘起,上压盘不会轴向移动,而下压盘在膜片弹簧的弹力作用下一起向右移动,导致顶杆与压头间隙减小,执行器动作行程需求减小。在离合器实际工作过程中发

现,顶杆处的磨损远大于摩擦片的磨损,因此整体上会造成离合器降挡所需行程增大。根据这一问题,本文提出了一种离合器半结合点自学习策略。为了不影响驾驶员的驾驶体验,选择在汽车长时间处于空挡状态时进行自学习,在汽车处于空挡位置超过30s时,默认接下的一段时间内驾驶员不会操作汽车,进行离合器半结合点自学习。

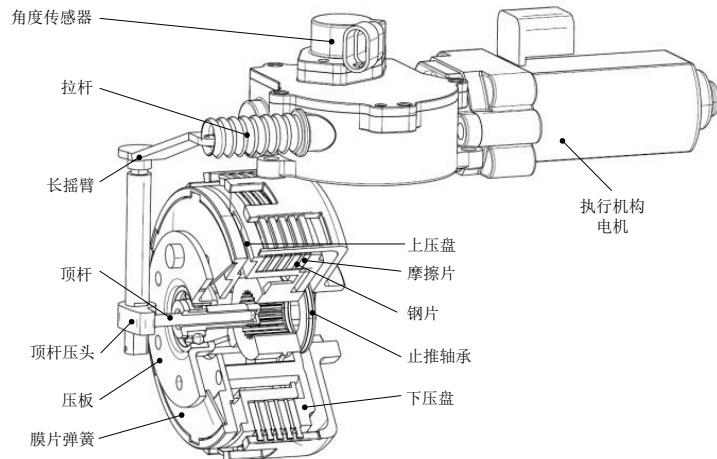


图2 离合器及执行机构的结构图

Fig.2 Architecture of clutch and actuators

2 离合器半结合点自学习策略

空挡时,首先控制摩擦片式离合器结合一定位移,然后给一个较小的油门指令使电机倒转,此时从电机到超越离合器外圈有两条动力传递路线,一条是由电机经一轴—一档主动齿轮—超越离合器外圈;另一条是由电机经一轴—摩擦片式离合器—空套轴—二挡主动齿轮—二挡从动齿轮—二轴—超越离合器内圈—超越离合器外圈。由于一、二挡齿轮的传动比不同,因此两条动力路线的超越离合器外圈转速也不同,会发生动力干涉现象,电机无法转动,此时缓慢的分离摩擦片式离合器直至一档状态解除动力干涉,并同时检测表征电机转速的脉冲数。

如上所述,离合器半结合点自学习过程有两个难点:① 离合器速度和位移控制,根据实车实验,要成功实现离合器半结合点自学习,需要在4s之内控制离合器移动15mm左右,因此,保证离合器快速达到目标位置是实现离合器半结合点自学习的基础;② 由于电机脉冲变化较快,而电机脉冲变化过程中的探测精度与半结合点的确定直接关联,因此,精准捕捉驱动电机脉冲变化以确定输入轴转速由零突变的瞬间是另外一个难点。

2.1 离合器位移控制

由于膜片弹簧的非线性特性以及机构摩擦力是一个与运动方向和速度相关的函数,所以在离合器分离过程中,所受的阻力是变化的。为了实现对离合器位移的精确控制,本文采用前馈+反馈控制方案,控制框图如图3所示。其中: x_c 为离合器位移;

x_c^* 为目标位移; v_c^* 为离合器目标移动速度; u_f 和 u_b 分别为前馈控制输入和反馈控制输入; u 为离合器及其执行机构整体控制输入。由图3可以看出,前馈部分采用了非线性查表控制,由于控制目标是保证离合器速度快速平顺和位移精确跟踪,因此前馈部分非线性查表与离合器目标移动速度和目标位移相关,提高前馈控制输入精确度;反馈部分采用简单易施的PID控制器,以尽量减少系统瞬态和稳态误差,并保证系统稳定性。

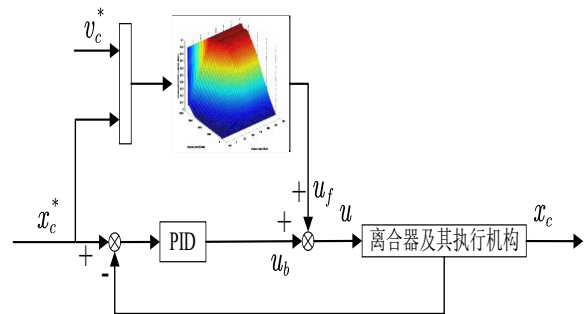


图3 离合器位移控制

Fig.3 Position control of clutch

2.2 离合器半结合点自学习

离合器半结合点自学习流程如图4所示,共分为4步。

(1) 准备。检测挡位信号,在汽车处于空挡时开始计时,如果保持在空挡状态超过30s即触发自学习模式使能命令。但若在30s内检测到挡位信号发生变化(驾驶员挂挡),将计时清零,在下次处于空挡时重新计时。

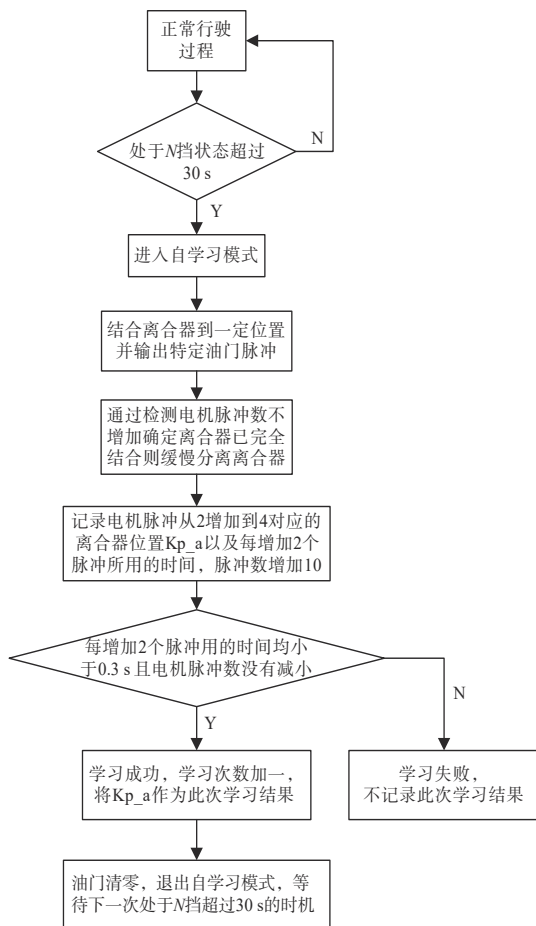


图4 离合器半结合点自学习流程

Fig.4 Self-learning process of clutch kiss-point identification

(2) 向二挡位置结合离合器,确定自学习起点位置。控制摩擦式离合器结合到一个比离合器半结合点更靠近二挡的位置,即自学习的起点位置,确保因为动力干涉,电机无法转动。

(3) 缓慢的向一挡位置分离离合器并检测电机脉冲变化。TCU输出倒挡信号和一个小油门指令使驱动电机倒转,此时由于动力干涉,驱动电机无法转动。将驱动电机脉冲数清零,控制离合器缓慢分离,同时TCU通过编码器检测脉冲的变化情况。如果电机脉冲数从2连续增加到10,且每增加两个脉冲所用的时间小于0.3s,则自学习成功,脉冲数增加的起点对应的离合器位置就是此次自学习的半结合点位置。

(4) 重复自学习过程求平均值。由于自学习可能被驾驶员打断而且自学习过程本身存在失败的可能性,因此需要进行多次学习保证学习成功且结果可靠。记录下10次成功学习得到的半结合点位置,并求取10次的平均值,作为一次最终的学习结果。

3 试验结果

为了验证所提出的自学习算法有效性,本文采用两组离合器进行自学习,一组是全新、未磨损的离合器,另一组为在实车上行驶超过2万km,有一定磨损的离合器。

图5a为新离合器的学习曲线。图中虚线为离合器目标位移曲线,实线为实际位移曲线。在1.00~1.30s期间,先将离合器从一挡分离状态结合一定位移作为自学习的起点位置,而后1.30~1.35s电机输出30%的油门而电机脉冲没有增加,说明此时离合器已经结合,可以作为自学习的起点。之后电机持续输出22%的油门,1.35s开始离合器缓慢分离,直至4.20s左右电机脉冲从零开始连续增加至10个,且每增加2个脉冲所用的时间在0.20s左右,代表学习成功,此时,脉冲增加的起点对应的离合器位置为23.9mm即为半结合点位置。

图5b为采用磨损的离合器进行自学习的结果,过程与图5a一致,学习结果为23.7mm。可以看出,随着离合器的磨损,学习得到的离合器半结合点位置减小,向一挡偏移,与离合器磨损造成的半结合点偏移规律理论分析一致。

为进一步验证自学习得到的结果的准确性,通过手动标定离合器半结合点位置的方式进行验证,新离合器标定的值为24.0mm,磨损过的离合器标定值为23.8mm,自学习得到的值与实际半结合点误差在0.2mm内,验证了自学习算法的有效性。同时,从图5可以看出,离合器实际位移能够很好的跟踪上目标位移,且位移变化过程比较平稳,同样说明采用的前馈+反馈的控制框架保证离合器系统稳定性,为自学习算法的实施提供了良好基础。

4 结语

本文针对电动汽车两挡机械式自动变速箱I-AMT结构,对于其离合器磨损后半结合点位置发生偏移,造成降挡时分离不彻底,一挡状态行驶离合器磨损严重的问题,提出了一种离合器半结合点自学习策略。

主要思路为在变速器长时间处于空挡时,给出一个倒转油门指令,在离合器从结合状态缓慢分离的过程中检测驱动电机的脉冲变化情况,将脉冲增加的起点对应的离合器位置作为半结合点位置。测试结果表明,随着离合器的磨损,自学习结果也随之

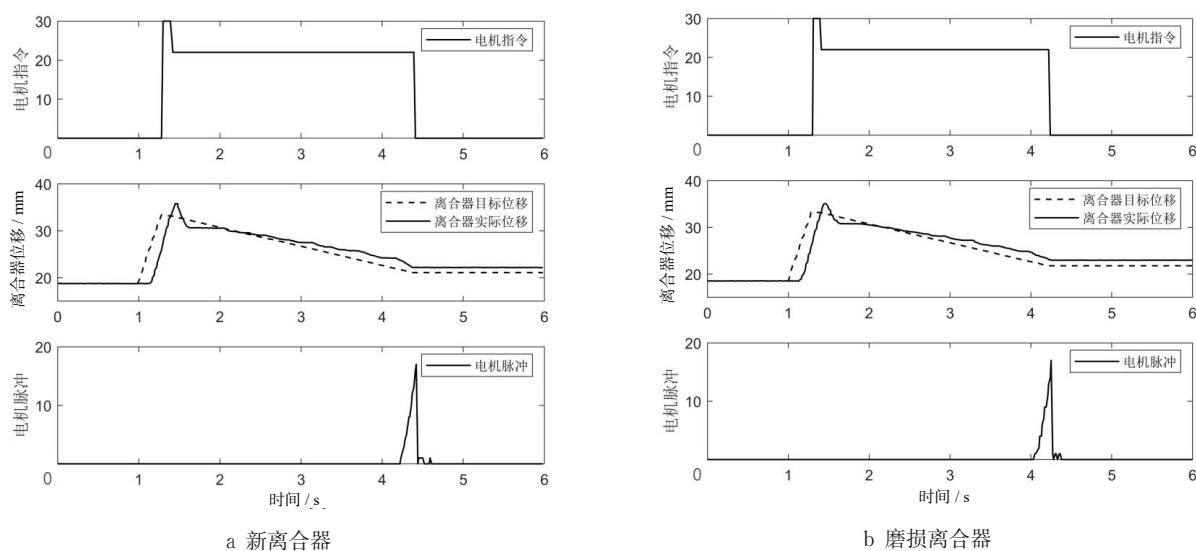


图5 离合器自学习曲线

Fig.5 Self-learning results of clutch

向一挡方向偏移,与手动标定的半结合点位置基本相符,误差不超过0.2 mm。因此,解决了I-AMT离合器磨损带来的离合器分离行程变大的问题,保证了综合换挡性能。

参考文献:

- [1] GAO B, LIANG Q, YU X, *et al.* Gear ratio optimization and shift control of 2-speed I-AMT in electric vehicle [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 50/51: 615.
- [2] SORNIOTTI A, LORO PILONE G, VIOTTO F, *et al.* A novel seamless 2-speed transmission system for electric vehicles: principles and simulation results [J]. *SAE Int J Engines*, 2011, 4(2): 2671.
- [3] 包凯. 纯电动汽车变速箱换挡机构的设计与性能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
BAO Kai. Design and performance analysis of gearshift mechanism of pure electric vehicle gearbox [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [4] SERRARENS A, VAN LIEMPT W, WEEL N, *et al.* Powershift module combination of friction brake and planetary gearset[J]. *ATZ worldwide*, 2010, 112(6): 30.
- [5] YUE H, ZHU C, GAO B. Fork-less two-speed I-AMT with overrunning clutch for light electric vehicle [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 130: 157.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] AHSSAN M, EKTESABI M, GORJI S. Electric vehicle with multi-speed transmission: a review on performances and complexities[J]. *SAE Int J Alt Power*, 2018, 7(2): 169.
- [9] CHOI W S, LEE K B, LIM W. A study on the speed-based active compensation of the kiss-point of dry-type clutch equipped with automated manual transmission [J]. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 2016, 24(3): 372.