

纯电动汽车两挡自动变速器转矩控制及其换挡动态仿真

周云山, 周晶晶, 蔡源春

湖南大学汽车电子与控制技术教育部工程研究中心, 长沙 410082

摘要 根据两挡自动变速器(2AMT)在纯电动汽车中的优势,设计了2AMT基本机械结构,阐述了换挡原理、换挡流程与换挡中可能存在的问题,分析了无离合器电动汽车换挡过程。针对换挡过程中的换挡冲击对换挡品质的影响,提出了对电机的转矩控制,利用 Matlab/Simulink 建立控制策略模型并联合 Cruise 平台以某款原型车进行建模仿真,建立台架试验验证了仿真结果。试验仿真结果表明,所设计的变速器换挡冲击度小、换挡品质高,该变速器及其控制方案满足设计要求。

关键词 2AMT; 换挡分析; 转矩控制; 试验仿真

中图分类号 U462.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.h2.005

Torque Control and Gearshift Dynamics Simulation in Two Speeds AMT of Pure Electric Vehicle

ZHOU Yunshan, ZHOU Jingjing, CAI Yuanchun

Engineering Research Center of Automotive Electrics and Control Technology of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract According to the advantage of the two speeds transmission in pure electric vehicle, the 2AMT basic structure and shifting mechanism is designed, the principle of shifting, the shift in the shift process and possible problems are described in detail and shift process of electric vehicles without clutch is analyzed. Based on influence of the impact of shifting on the shift quality in the process of shifting, the torque control is proposed. The control strategy model is established by Matlab/Simulink and modeling and simulation are carried out on a certain vehicle on Cruise platform. Finally testing for validation is performed. The results show a small degree shift shock and the high shift quality, indicating that the transmission and the designed control scheme can well meet the requirements.

Keywords 2AMT; shift analysis; torque control; test simulation

0 引言

目前汽车大多以汽油或柴油作为燃料,随着燃油价格的节节攀升和温室气体效应的日趋严重,寻求一种应用于汽车的再生清洁能源日益迫切。电能是被世界公认的一种可再生清洁能源,而相对于传统内燃机,电机的工作范围宽,且电机特性是在低速时恒转矩,高速时恒功率,更加适合车辆运行需求,因而采用电机驱动的电动车辆及混合动力车辆得到了较快的发展^[1]。

尽管电机有着良好的调速性能,基本上能满足车辆对于调速的要求,但采用变速器换挡具有更明显的优势。首先,对

于集中电机加单级减速机构,添加变速器,可以减小主减速器和驱动电机的体积,便于在车辆上进行布置;其次,相对单电机驱动,添加变速器能对电机的性能要求有所降低,节约了系统制造成本;此外,通过变速器换挡技术,该驱动系统具有更广的高效运行范围,可以提高能源利用效率;最后,通过添加变速器,可以对电机控制器内功率器件额定功率的要求有所降低^[2]。对于目前的纯电动车来说,采用两档式变速器完全能满足电动车在城市运行情况的需要,而且 AMT 结构简单,控制方便,与驱动主电机也能轻易的通过控制器局域网络(CAN)建立联接,因此两挡自动变速器(2AMT)最适于应用

收稿日期:2013-06-17;修回日期:2013-08-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA111710)

作者简介:周云山,教授,研究方向为动力总成、新能源汽车、液压传动与控制,电子信箱:zys_8888@sina.com



在纯电动车上。

1 自动变速器动力传动系统

发展 AMT 的初衷是为了实现自动化换挡, 简化复杂的手动操作, 降低劳动强度, 其基本原理即在传统的固定轴式变速器(MT)的基础上加装自动换挡控制系统(ASCS), 采用变速器控制单元(TCU)控制执行机构。根据驾驶员发出的换挡要求, 替代人完成离合器分、合动作及换挡动作。根据实际情况, 设计的两档式变速器结构及传动路径如图 1 所示。在图 1 所示变速器中, 两对齿轮空套在传动轴上, 通过中间同步器的两个齿圈的啮合来选择对应的挡位, 同步器通过换挡电机驱动换挡执行机构来进行换挡操作。

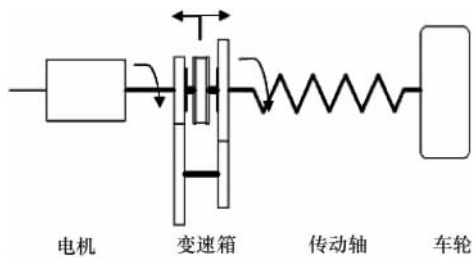


图 1 2AMT 传动简图

Fig. 1 2AMT transmission diagram

图 2 所示为纯电动车的整车控制换挡流程, 当车辆在路面行驶时, AMT 控制器采集来自整车的电机转速信号、加速踏板信号、电动车速度信号等, 根据储存在控制器中的换挡规律判断此时是否换挡。当满足换挡条件时, AMT 控制器向总线发送信息, 通过总线与电机控制器进行通信。同时, AMT 控制器发送驱动信号给换挡电机, 进行相应的换挡动作^[1]。其中驱动电机通过花键直接和变速器输入轴相连, 1 挡的速比为 3.765, 2 挡的速比为 1.531; 2AMT 的换挡电机采用的是 24V 直流有刷电机, 转速为 3000r/min, 减速比为 3。

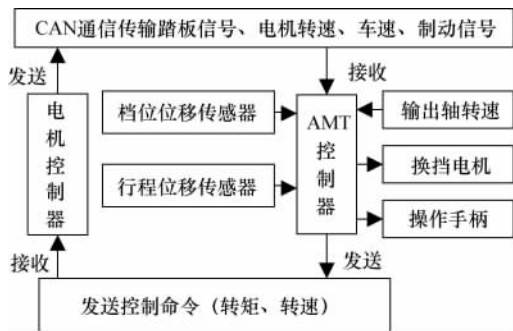


图 2 纯电动汽车控制系统

Fig. 2 Control system diagram of pure electric vehicle

2 变速器换挡过程分析

2AMT 换挡过程简单, 相对于多挡位变速器, 省去了选位电机及其控制, 整个换挡过程中, 只需对驱动电机和换挡电机进行协调控制, 同时考虑到驱动电机和变速器的转速波

动, 可以得到很好的换挡品质。

2.1 动力中断

在车辆正常行驶时, 变速器输入轴上的齿轮与同步器啮合, 齿轮间存在较大的纵向力, 不利于挡位分离与重换新挡(图 3)。在该电动车上, 舍弃了离合器, 因此在换挡时需对电机进行卸载, 即使处于相应的空载转矩^[3,4]; 图 3 中 J_1 为换算至变速器输入轴上的转动惯量; J_2 为换算至变速器输出轴上的转动惯量。

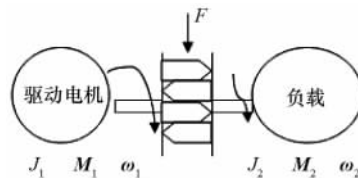


图 3 电动汽车正常行驶时传动分析图

Fig. 3 Transmission analysis chart of a normally driving electric car

此过程中车辆的电机动力输出端至车轮间的运动学和动力学关系是确定的, 可用数学矩阵表示

$$I \cdot D\omega(t) = M(t) \tag{1}$$

式中, D 为微分算子 $D = \frac{d}{dt}$ 。

$$I = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix}, \omega(t) = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}, M(t) = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 - \frac{M_d}{i_0} \end{bmatrix}$$

$$j = \frac{dM_1}{dt}, j = J\ddot{\omega}_1 \tag{2}$$

式中, I 为转动惯量矩阵, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; J_1 为变速器输入轴上的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; J_2 为变速器输出轴上的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; M_1 为输入轴转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; M_2 为输出轴转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; M_d 为地面阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; ω_1 为输入轴角速度, rad/s ; ω_2 为输出轴角速度, rad/s ; i_n 为变速器原挡位传动比; i_0 为主减速比; j 为换挡冲击度, $\text{N} \cdot \text{m/s}$ 。

2.2 换挡与转矩控制

2.2.1 换挡行程

在电机卸载后, AMT 控制器发送指令给换挡电机, 换挡电机驱动换挡执行机构进行换挡。图 4 所示为两挡变速器的换挡行程及其结构, 其中理想换挡行程 l 为 17mm, 空挡为中间位置, 换挡电机推动拨叉进行相应的升挡或降挡, 利用两个霍尔传感器作为挡位状态信号, 当换挡执行机构上的磁铁感应到信号时, 发回摘挡到位信号给 AMT 控制器, 从而停止换挡电机。

2.2.2 转矩控制

由式(2)可知, 在换挡过程中产生的换挡冲击为电机输出转矩对时间的导数, 因此提出了对电机的输出转矩控制。在车辆运行过程中, 基于驾驶员对车辆的需求不同, 电机的工作模式也相应不同。在起步时, 电机恒转矩工作; 换挡时, 电机卸载, 不输出力矩; 高速时, 电机又工作在恒功率区。驾

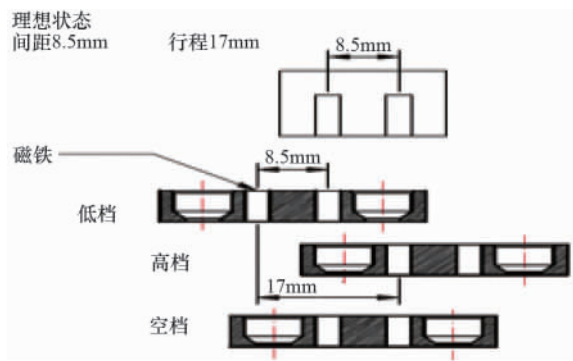


图4 两挡变速器换挡行程
Fig. 4 2AMT shift stroke

驾驶员需求功率 $P_{require}$ 和需求转矩 $T_{require}$ 分别为

$$P_{require} = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mg \cdot f \cdot u_a}{3600} + \frac{mg \cdot i \cdot u_a}{3600} + \frac{C_{dl} \cdot A \cdot u_a^3}{76140} + \frac{\delta \cdot m \cdot u_a \cdot \alpha}{3600} \right) \quad (3)$$

$$T_{require} = \frac{P_{require}}{n} \cdot 9550 \quad (4)$$

式中, η_t 为传动总效率; m 为整车质量, kg; f 为滚动阻力系数; i 为坡度, rad; u_a 为车辆行驶速度, km/h; C_{dl} 为风阻系数; A 为迎风面积, m^2 ; δ 为整车质量换算因子; α 为行驶加速度, m/s^2 ; n 为电机转速, r/min; 在起步时, 电机工作在恒转矩区, 设定最大转矩为 T_{max} , 令 n_{th} 为一阈值转速, 当 $n < n_{th}$ 时, 有

$$T_{require} = T_{max} \quad (5)$$

当 $n > n_{th}$ 时, $T_{require}$ 以式(4)计算为准。

2.3 换挡同步

换挡时, 由同步器与相应挡位齿轮进行啮合, 在换挡这一段时间内, 负载的转动惯量很大, 可以近似的认为车速不变, 需要对电机进行调速, 使同步器的转速与相应挡位对应; 司机以 1 挡起步, 当电机转速到达 n_1 时, AMT 控制器发送换挡命令, 此时车速不变; 换到 2 挡时, 变速器输入轴转速应降到 n_2 , 令换挡前车速为

$$v_{i1} = K \cdot \frac{n_1}{i_{i1} i_0} \quad (6)$$

式中, $K = \frac{\pi r}{30}$; r 为轮胎半径, m; i_{i1} 为 1 挡速比; i_0 为主减速比; n_1 为换挡前电机转速, r/min。换到 2 挡时车速暂时 v_{i2} 不变^[5], 因此有

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{i_{i2}}{i_{i1}} \quad (7)$$

式中, i_{i2} 为 2 挡速比; n_2 为换挡后电机转速, r/min。在每次换挡时, 由电子控制单元计算好同步转速, 精确控制电机转速, 以此解决因换挡动力中断与换挡品质之间的矛盾。

2.4 动力恢复

换挡完成后, 电机控制器根据驾驶员需求功率以计算好的需求转矩, 通过 CAN 总线发送相应转矩的信息, 控制电机从转速状态恢复到转矩状态。

3 纯电动车整车仿真与台架试验

3.1 整车仿真

图 5 所示为升挡的控制策略程序流程图, 以 Simulink 模型控制电机转矩, 在 Cruise 平台上搭建整车的仿真模型, 试验中以江淮同悦 (HF7000AEV) 的一款纯电动汽车为原型, 采用电机为浙江尤奈特生产的直流无刷电机, 将编制好的 Simulink 模型转换为 dll 动态文件嵌入 Cruise 模型中^[9], 采用的循环工况为 EUDC_{aut}, 并根据整车参数调整车速^[7]。表 1 为仿真整车参数, 图 6 所示为截取的部分升挡动态过程, 从图中可以看出整个升挡过程车辆有关部分的动作, 并存在换挡重叠, 进一步缩短换挡时间, 升挡时间约为 1.4s。 $\ddot{\omega}_1$ 表征换挡冲击的变化, 从图中可以看出, 换挡冲击数值很小。其中整车最高车速约为 101km/h, 满足城市工况对车速的要求。由此看出, 所设计的基于转矩的控制策略完全满足设计要求。

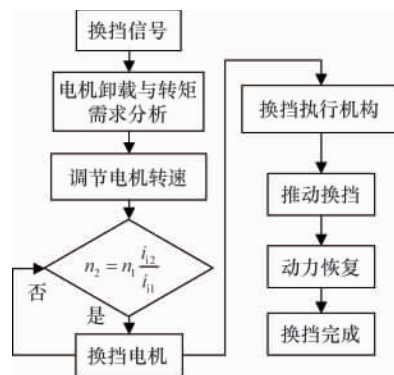


图5 换挡流程图
Fig. 5 Flow chart of shifting

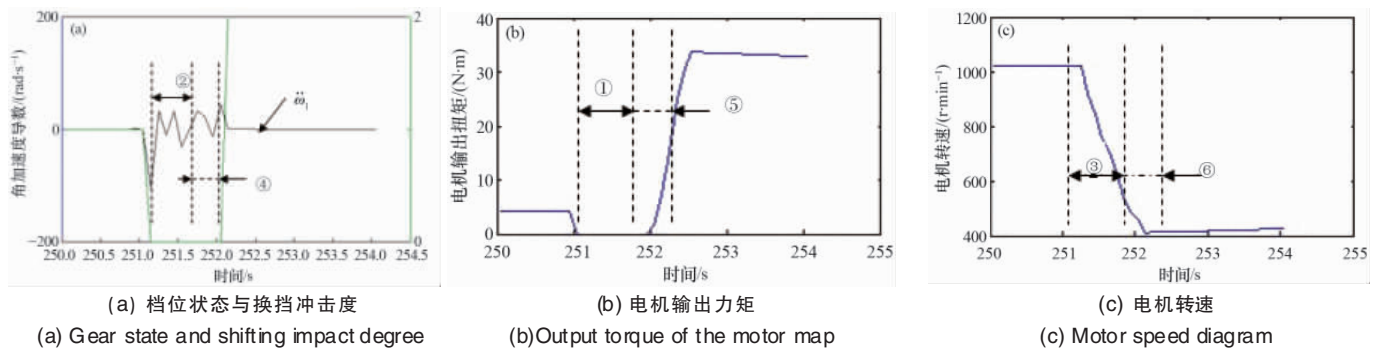
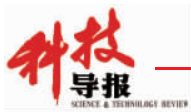
表1 整车参数

Table 1 Parameters of vehicle

| 参数名称 | 参数值 |
|--------------------------------|-------|
| 整车满载质量/kg | 1500 |
| 滚动阻力系数 | 0.012 |
| 风阻系数 | 0.3 |
| 迎风面积/ m^2 | 1.75 |
| 电机最高转速/($r \cdot \min^{-1}$) | 6000 |
| 电机额定转速/($r \cdot \min^{-1}$) | 2000 |
| 车轮动态半径/m | 0.283 |
| 主减速比 | 4 |
| 传动总效率 | 0.92 |

3.2 台架试验

在台架试验中建立车辆的 1/2 模型, 如图 7 所示, 利用 Labview 和 CAN 数据采集卡, 采集试验中电机的运行数据, 图 8 所示为采集卡所得数据经计算得到的车辆两个挡位下加速度特性曲线, 其中实线表示 1 挡位的曲线, 虚线表示 2 挡位的曲线。为查看电机在额定功率下高低挡的加速度特性, 以



① 电机卸载;② 脱挡与摘空挡;③ 电机调速;④ 同步器接合;⑤ 电机转矩控制;⑥ 换挡完成
① Motor unloading; ② Select neutral; ③ Motor speed control; ④ Synchronizing; ⑤ Motor torque control; ⑥ Shift end

图 6 升挡动态过程

Fig. 6 Dynamic process of upshifting



图 7 台架试验

Fig. 7 Figure of bench

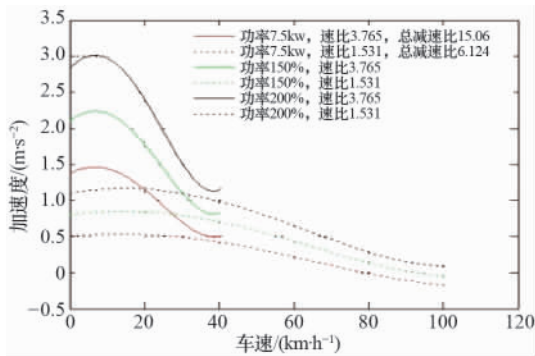


图 8 各挡位加速度曲线

Fig. 8 Acceleration curve of each gear

及比较在大功率情况下的相应曲线,考虑车辆运行时需求功率增加的情况,如 150%表示在额定功率 1.5 倍的情况下的运行曲线,在同一曲线中加速度特性曲线呈图 8 所示。从图 8 可以看出试验中该转矩控制策略对车辆加速度特性的影响,进一步验证了控制策略的实用性。

从台架试验得出的结果来看,电机运行良好,最高车速与仿真结果基本一致。

4 结论

利用软件仿真的便利性与台架试验的现场验证,建立并验证了换挡过程电机转矩的控制策略,使得换挡冲击度小,换挡平滑,充分利用了 2AMT 在纯电动汽车上的优势。从所

得结果看,在换挡过程中对电机转矩的额外控制很有效果,从原型车仿真所得结果可得结论如下。

(1) 通过 Simulink 和 Cruise 两个软件的联合仿真做出并验证了电机转矩的控制策略,从所得效果来看,很大程度上减少了换挡冲击,该控制策略也完全满足车辆对车速和加速度的要求。

(2) 利用 Cruise 平台在整车仿真上的优势,然后对重要部位进行台架试验,两者的结合是一种十分有效的工程研究方法。

参考文献 (References)

- 席军强, 王雷, 付文清, 等. 纯电动客车自动机械变速器换挡过程控制[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(1): 42-45.
Xi Junqiang, Wang Lei, Fu Wenqing, et al. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(1): 42-45.
- 傅洪. 车用驱动电机-变速器一体化系统换挡过程研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
Fu Hong. Gear shifting process studying of motor-transmission integrated system for vehicle driving[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- 黄建明, 曹长修, 苏玉刚. 机械式自动变速器的换挡控制[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(1): 86-89.
Huang Jianming, Cao Changxiu, Su Yugang. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(1): 86-89.
- 吴森, 周炳峰, 樊荣. 基于电机主动同步原理的 AMT 设计[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理过程版, 2010, 32(4): 569-572.
Wu Sen, Zhou Bingfeng, Fan Rong. Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Process, 2010, 32(4): 569-572.
- 罗玉涛, 周斯加, 赵克刚. 混合动力汽车上 AMT 的换挡过程分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 33-36.
Luo Yutao, Zhou Sijia, Zhao Kegang. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 35(2): 33-36.
- 周良锋, 郭仲海. 基于 Cruise 的 AMT 汽车换挡规律仿真分析与优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2011(4): 38-42.
Zhou Liangfeng, Guo Zhonghai. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2011(4): 38-42.
- 董翔宇, 席军强, 陈慧岩. 并联混合动力汽车 AMT 无离合器换挡同步过程控制[J]. 汽车工程, 2011, 33(12): 1047-1050.
Dong Xiangyu, Xi Junqiang, Chen Huiyan. Automotive Engineering, 2011, 33(12): 1047-1050.

(编辑 季超)