

混合动力轿车机械式自动变速器换挡过程中的动力系统协调控制方法*

廖承林 张俊智 卢青春

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100081)

摘要:介绍了一种采用机械式自动变速器(AMT)的混合动力电动汽车(HEV)动力总成。HEV上采用AMT有同步器磨损、离合器磨损和动力中断时间等三个主要问题,用传统的AMT换挡控制方法难以解决。分析了这些问题产生的根源和解决方法,提出了AMT换挡过程中的动力系统协调控制方法,可缩短换挡过程中的动力中断时间、减小同步器和离合器磨损。通过仿真、硬件在环测试和实车试验对该方法测试和验证,试验结果证明了该控制方法的有效性。

关键词:混合动力电动汽车 机械式自动变速器 动力系统协调控制 换挡品质

中图分类号: U461.91

0 前言

随着我国石油资源的短缺和大气污染日趋严重,采用传统内燃机作为动力源的轿车正在面临石油价格昂贵和严重污染环境的双重困境。能够提高经济性和减少大气污染的汽车动力系统正在成为汽车技术的前沿课题。混合动力轿车具有低能耗、低排放等优点,已成为当前汽车技术研究的热点。国外在混合动力电动汽车的开发方面已经取得重大进展,比如丰田公司的Prius和本田公司的Insight等车型实现了产品化生产,成本不断下降,已接近传统轿车的价格^[1]。

并联式混合动力系统的驱动力由发动机和电动机叠加而成。根据发动机和电动机动力耦合方式的不同,并联式混合动力系统可分为变速器前耦合、变速器后耦合以及四轮驱动的并联式混合动力系统等几种方式^[2]。混合动力系统采用变速器前耦合方式,将电动机安装在变速器的输入轴上,通过离合器连接发动机的曲轴。变速器采用AMT,具体原因在后文进行说明。这种结构将电动机安装在变速器的输入轴上,显著加大了输入轴的惯量。

1 问题的提出

并联式混合动力方案中,变速机构是很重要的部分。现有混合动力轿车的动力传动系统一般采用行星变速机构与电动机构成无级变速(如丰田的

Prius)或采用CVT(无级变速器,如日产的Tino),其成本较高。对我国的现有技术条件而言,采用Prius的行星变速机构涉及到专利问题,采用CVT则价格较高,都不利于国内自主研发混合动力轿车的产业化。比较现实可行的方案是采用机械式自动变速器(AMT)形式的变速机构,成本很低,可以实现自动换挡,并具有手动变速器(MT)型变速机构的高效性。但采用AMT也存在一些弊端,比如同步器磨损与寿命问题、离合器的磨损与自适应性问题、动力中断问题与轿车换挡舒适性要求很高等。这也是AMT在重型车上得到了推广,却难以在轿车上得到应用的原因。那么,在混合动力轿车上,是否能够克服上述问题呢?

1.1 同步器磨损问题

如图1,混合动力轿车AMT的换挡过程与传统车AMT大体相似,都包括四个基本步骤:分离离合器、摘挡、挂挡和接合离合器等。根据动能定理,如图1的第三步挂挡前后,变速器输入轴动能的变化情况为

$$E_1 - E_2 = (J_m + J_1)(\omega_1^2 - \omega_2^2)/2 = E_t \quad (1)$$

式中 E_1 —— 摘挡后变速器输入轴动能

E_2 —— 挂挡后变速器输入轴动能

E_t —— 同步器吸收的动能

J_m —— 电动机转动惯量

J_1 —— 变速器输入轴转动惯量

ω_1 —— 摘挡后变速器输入轴转动角速度

ω_2 —— 挂挡后变速器输入轴转动角速度

假设换挡前后车速不变,则

$$\omega_1 = \omega_2 k_1 / k_2 \quad (2)$$

* 国家 863 计划资助项目(2005AA501220)。20050328 收到初稿, 20050802 收到修改稿

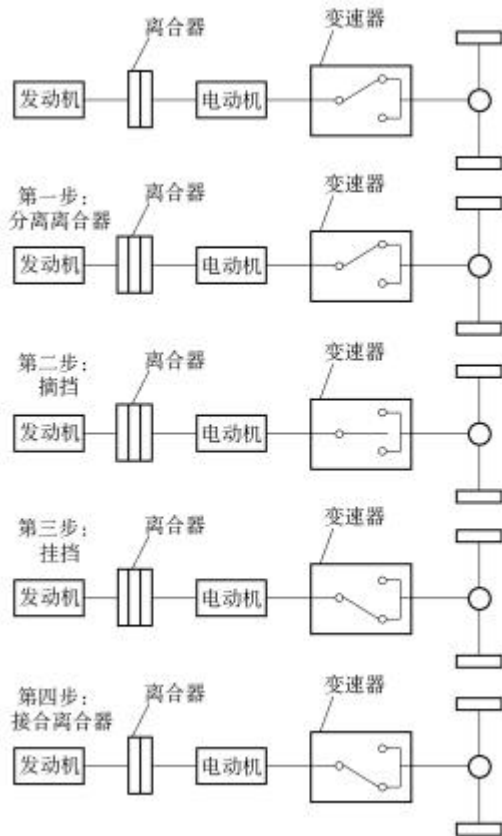


图 1 换挡基本步骤示意图

式中 k_1 —— 挂挡前的挡位速比

k_2 —— 挂挡后的挡位速比

由式(1)中可知, 变速器输入轴转动惯量由传统车的 J_1 增加为混合动力车的 J_m+J_1 , 相应地, 换挡过程中需要由同步器吸收的动能增加了 $J_m(w_1^2-w_2^2)/2$, 带来的直接后果是挂挡操作变得比较困难, 同步器磨损加大, 寿命减小。一般而言, 实际使用的电动机额定功率越大, 其转子的转动惯量也越大, 对同步器的磨损也越大, 换挡越困难。

1.2 动力中断时间长短问题

如图 1, 传统 AMT 换挡的第一步分离离合器后到第四步接合离合器之前, 始终处于动力中断状态, 导致车辆的动力性和驾驶感觉受到严重影响。动力中断的时间长短, 与换挡舒适性是一对矛盾, 即如果要提高舒适性, 就难以缩短动力中断时间; 反过来, 如果要想缩短动力中断时间, 则会牺牲舒适性。轿车对舒适性、动力性和驾驶感觉要求都比较高, 而重型车辆对舒适性要求则可以降低, 这是传统 AMT 在轿车上难以得到应用的原因之一。

1.3 离合器的磨损问题

离合器磨损问题也是传统 AMT 难以在轿车上得到应用的原因之一。在 AMT 换挡过程的第一步分离离合器和第四步接合离合器中, 都会导致离合器的磨损, 其中最主要的磨损产生在第四步。以第

四步接合离合器为例, 离合器磨损产生的根源是发动机转动惯量和离合器接合前后主/从动盘速差产生的动能变化, 如果不进行发动机调速控制, 假设换挡期间车速不变, 则离合器最大的滑摩功为

$$W_c = J_e(w_1^2 - w_2^2)/2 \quad (3)$$

式中 J_e —— 发动机转动惯量

离合器的磨损, 会导致离合器半接合点的变化, 给换挡过程中的离合器接合控制带来问题, 也就是说离合器磨损给 AMT 控制器带来了自适应性问题, 如果不能解决, 则会导致换挡品质的下降。在国外一些 AMT 解决方案中, 出现了离合器半接合点自调节装置, 可以基本维持半接合点的位置, 但该装置成本增加较多。

实际上, 传统车 AMT 换挡过程中一般会进行发动机调速控制, 这样可以减小离合器接合时的主/从动盘速差。但发动机调速需要一定的时间, 因而离合器的磨损大小与动力中断时间也是一对矛盾。通过发动机与变速器的一体化控制, 可以减小离合器的磨损, 但其提高的空间已到达极限。

2 解决方法分析

事实上, 这里研究的混合动力轿车中, 通过动力系统的协调控制, 能够有效解决上述三个问题。

2.1 同步器磨损问题的解决方法

从式(1)中可以看出, 同步器的磨损产生的原因是变速器输入轴转动惯量 J_m+J_1 和挂挡前后挡位速比变化带来的变速器输入轴速差 $w_1-w_2 = (1-k_2/k_1) \times w_1$, 挡位速比变化越大, 车速越高, 电动机转动惯量越大, 则磨损越大。输入轴的转动惯量无法通过控制方法来减小, 因此解决同步器磨损问题唯一的方法是主动减小挂挡前后的变速器输入轴速差。在手动变速器的发展史上, 曾经出现过两脚离合器的操作方法, 通过发动机来调节变速器输入轴的转速, 减小挂挡前后的速差。但这种方法的缺点是换挡过程较长, 离合器分离和接合频繁, 不适合在轿车上使用。由于轿车上使用的手动变速器输入轴转动惯量相对较小, 一般都通过同步器来吸收挂挡前后速差带来的动能变化量, 导致了同步器的磨损。前面已经论述过, 混合动力轿车上直接通过同步器来吸收动能变化量会导致挂挡困难, 同步器磨损加大, 因此不能使用这种方法。

最好的方法是通过电动机控制来主动消除挂挡前后输入轴的速差, 这样可以彻底解决同步器的磨损和挂挡困难问题。具体说来, 在升挡过程中, 电

动机工作于发电工况，把挡位变化导致的输入轴动能变化转化为电能给电池充电；而在降挡过程中，电动机则工作在驱动工况，提高变速器输入轴转速，主动消除挂挡前后的速差。

2.2 缩短动力中断时间的解决方法

从图 1 中知道，从第一步的离合器分离操作开始之前的发动机输出转矩控制到零开始，直到离合器接合以后发动机恢复转矩输出，其间一直处于动力中断状态，车辆没有驱动力。这个时间越长，驾驶感觉越差，动力性也越差。仔细分析换挡过程中的各步骤可以发现，有两个环节可以缩短动力中断时间。

一是离合器分离前。当发动机节气门开度开始逐步减小到零，直到离合器分离这段时间，电动机可以提供驱动转矩，驱动车辆行驶。而当离合器分离以后，则让电动机空转，进入摘空挡操作。这段时间在 AMT 车上相对较短，可以缩短的动力中断时间较小。

二是挂挡成功以后，在离合器接合、发动机恢复转矩输出之前这段时间，电动机也可以提高驱动转矩，驱动车辆行驶。这段时间在传统 AMT 车上相对较长，可以明显缩短动力中断时间。

显然，上述两种缩短动力中断时间的方法，都是建立在不影响同步器磨损、离合器磨损和换挡舒适性的前提上的，也就是说与提高换挡舒适性和减小离合器磨损并不矛盾。

2.3 减小离合器磨损的解决方法

前面的分析可以看出，换挡时离合器的接合过程中的磨损主要取决于离合器主/从动盘速差和发动机的转动惯量。与传统车 AMT 相似，HEV 也需要通过调节发动机转速来减小甚至消除离合器主/从动盘速差；不同的是，由于增加了电动机和一体化启动发电机(ISG)作为动力源，可以加快发动机转速的调节时间，减小离合器磨损。以升挡为例，具体方法如下。

(1) 在第一步分离离合器完成后，发动机进行断油控制，ISG 工作在发电工况，将发动机动能转化为电能储存在电池中。这样可以大大加快发动机转速的调节时间。

(2) 挂挡成功以后，电动机进入驱动工况，驱动车辆行驶，直到发动机转速调节消除了离合器主/从动盘速差以后，再接合离合器。

这样就可以最大限度地减小离合器的磨损。综合上述三个主要问题的解决方法可以看出，HEV 上使用 AMT 具有先天的优越性，通过发动机、电动机和 ISG 等动力系统的协调控制，可以有效解决传

统车 AMT 上的一些固有的问题，特别是可以最大限度地减小同步器和离合器的磨损，这对提高 AMT 的寿命和可用性具有重要意义。

3 换挡过程协调控制方法

根据前文的分析，考虑到实际车辆上的具体情况，可以获得图 2 中的换挡过程协调控制方法，该方法可以总结为 6 大步骤。

- (1) 减小动力源的输出转矩，分离离合器。
- (2) 离合器分离后开始调整发动机转速；与此同时控制电动机空转，摘挡。
- (3) 控制电动机转速，减小同步器前后转速差。
- (4) 同步器前后转速差小于设定范围后，挂挡。
- (5) 控制电动机转矩驱动车辆行驶，并等待离合器主/从动盘转速差小于设定范围后，结合离合器。
- (6) 根据驾驶员需求进行动力源转矩恢复控制。

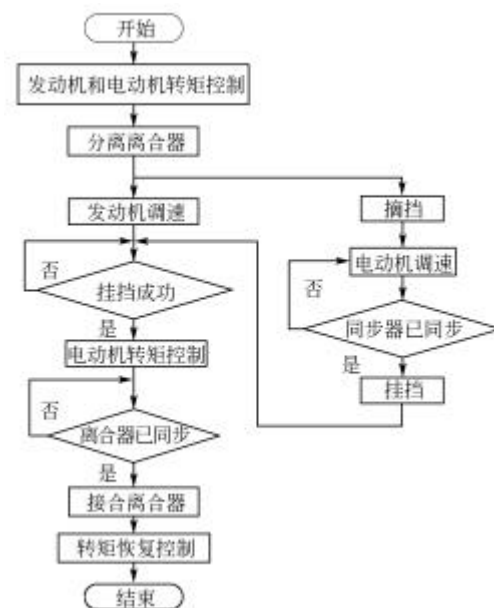


图 2 换挡过程协调控制流程图

4 仿真研究

为研究 HEV 换挡过程中发动机与电机的协调控制问题，在 MATLAB/Simulink&Stateflow 环境下建立了一套模块化的混合动力电动汽车动力系统仿真模型(图 3)，能够对 HEV 换挡过程和换挡过程中发动机与电动机的协调控制进行仿真。主要模块有发动机模块、电动机模块、ISG 模块、电池及其管理系统模块、配电系统模块、离合器模块、AMT 模

块、ABS 制动系统模块、整车 - 路面模块和多能源动力总成控制器电控单元(HCU)模块等。其中变速器模块包括了 AMT 控制器模型和变速器模型。AMT 控制器模型内部根据实车信号定义建立了相应的换挡规律和换挡控制逻辑，对离合器与变速器动作进行控制，能够与动力总成控制器相互配合完成整个换挡过程。变速器模型包括齿轮啮合模型和同步器模型。该模型能够模拟 AMT 执行机构动作时序，对换挡同步过程进行模拟，并能够得到同步动态过程中的各物理量。

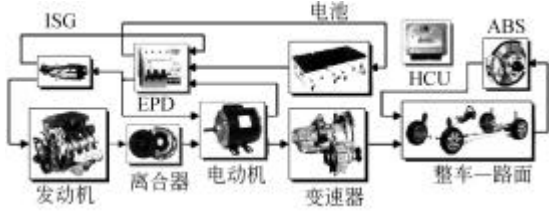


图 3 仿真模型的模块化结构图

采用以上仿真模型对换挡控制流程图中的控制方法进行了仿真研究，重点研究换挡过程中有无发动机和电动机调速对离合器和同步器磨损的影响。

以相同情况下的 2 挡换 3 挡为例，如图 4，左边是有无发动机调速的离合器滑摩功率仿真结果对比，右边是有无电动机调速的同步器滑摩功率仿真结果对比。曲线所包围的面积大小即反应了滑摩功的大小。从图 4 中可以看出，没有发动机调速时，离合器磨损较大，打滑时间也较长；而没有电动机调速时，同步器磨损较大，打滑时间比进行电动机调速长很多，直接的表现就是挂挡时间较长。由此可见，有无动力系统的协调控制，对同步器寿命、离合器寿命和换挡时间都有较大影响。

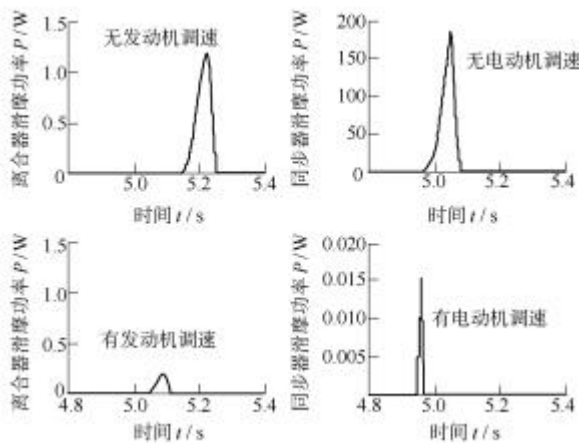


图 4 2 挡升 3 挡的滑摩功仿真测试结果对比

5 硬件在环测试

利用仿真模型进行控制器的软件开发，将所研

究的协调控制方法应用到动力总成的控制中后，需要对控制方法软件进行实际闭环测试。由于某些原因，如：极限测试、失效测试，或在真实环境中测试费用较昂贵等，使实际测试难以进行，因而需要采用硬件在环仿真技术进行控制器的开发和测试。文中的硬件在环仿真技术用 dSPACE 模拟器替代全部或者部分被控对象模型，由实际控制单元在半实物环境中进行功能测试，加快了对动力总成控制器性能和功能验证的过程。硬件在环仿真系统的结构如图 5。限于篇幅，这里对测试结果不作详细说明，具体的分析放在实车试验结果中。硬件在环测试验证了换挡过程中动力系统的协调控制方法基本正确，可以进行实车试验验证。

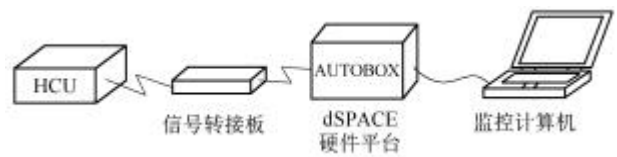


图 5 硬件在环测试系统结构图

6 实车试验

实车试验的主要目的是在实车道路行驶中，对换挡过程中动力系统发动机和电动机的协调控制方法进行验证和适当的调试，在同步器磨损、离合器磨损和动力中断时间等方面达到良好的控制效果，获得良好的换挡品质。

试验中发现，若不进行电动机的调速控制或者调速控制得不好，都会对前文换挡协调控制流程步骤(4)的挂挡操作带来困难，经常会出现挂挡打齿和挂挡时间较长等现象，车速越高越明显。而电动机调速控制较好时，同步器速差小，挂挡很容易，没有出现打齿声。这也验证了关于挂挡操作的分析和仿真测试结果，换挡过程中电动机的协调控制可以明显减小同步器的磨损，确保挂挡成功。

图 6 是一次 2 挡升 3 挡的换挡过程曲线，换挡过程中没有进行电动机的转矩控制。从图 6 中可以

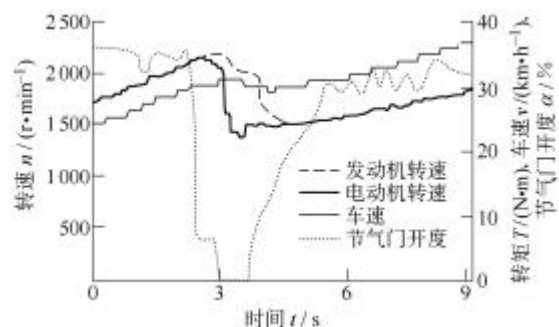


图 6 无电动机转矩控制的 2 挡升 3 挡过程

看出, 换挡结束后, 由于离合器尚未同步, 电动机也没有恢复转矩输出, 处于动力中断时期, 车速稍有下降。一直到离合器接合, 节气门开度恢复以后, 发动机输出驱动转矩, 车速才开始上升。

图 7 是一次有电动机转矩控制的 2 挡升 3 挡的实车试验结果。在换挡过程中进行了发动机和电动机的转矩控制与转速同步控制。在换挡过程中, 电动机的调速较快, 同步器很快就到达同步进行挂挡; 挂挡结束后在等待离合器同步的同时增加了电动机的驱动转矩输出, 直到离合器主/从动盘差很小时才接合离合器, 使得换挡过程中离合器磨损较小、动力中断时间缩短; 离合器接合以后, 随着节气门开度的逐步恢复, 电动机转矩又逐渐减小直至到零。整个换挡过程动力中断时间相对减少, 车速基本不下降。从实际的乘坐效果来看, 换挡平稳性也比较理想。

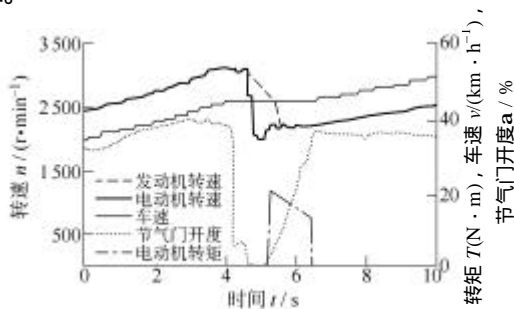


图 7 有电动机转矩控制的 2 挡升 3 挡过程

实车试验结果表明, 采用的换挡过程协调控制方法确实能够减小同步器和离合器磨损, 并缩短动力中断时间。

7 结论

在混合动力轿车采用 AMT 作为变速机构, 既给换挡控制带来了挂挡困难等新的问题, 又给 AMT 在 HEV 上的实用化创造了机会。通过发动机、电动机和 ISG 等动力源的协调控制, 混合动力系统能够有效解决传统 AMT 车的同步器磨损、离合器磨损和动力中断时间较长等重要问题。由于条件限制, 未能充分发挥混合动力系统的 ISG 和电动机控制对换挡品质控制的全部潜力, 但通过仿真、硬件在环

测试和实车试验等方法, 还是验证了所采用的动力系统协调控制方法对改善 AMT 换挡品质具有良好的控制效果, 特别是在缩短动力中断时间、减小同步器和离合器磨损等方面效果明显。

参 考 文 献

- 1 Floyd A. Wyczalek. Hybrid electric vehicle year 2000 status. IEEE AES Systems Magazine, 2001: 15~25
- 2 张俊智, 王丽芳. 不同混合动力电动轿车方案的比较与分析. 汽车工程, 2002, 24(4): 290~293

COORDINATED POWERTRAIN CONTROL METHOD FOR SHIFTING PROCESS OF AUTOMATED MECHANICAL TRANSMISSION IN THE HYBRID ELECTRIC VEHICLE

Liao Chenglin Zhang Junzhi Lu Qingchun
(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100081)

Abstract: A kind of powertrain structure is introduced which adopts automated manual transmission (AMT) in the hybrid electric vehicle (HEV). Automated mechanical transmission in the hybrid electric vehicle has three problems of wear of synchronizer, wear of clutch and interruption time of powertrain. It is difficult to solve these problems by traditional shifting control method. The coordinated powertrain control method is presented to shorten interruption time of power and to diminish wear of synchronizer and clutch through analyzing the matter and resolvent of problems. This method is tested and verified in simulating test, hard-in-loop test and proving ground test. Results of test prove that the method is effective.

Key words: Hybrid electric vehicle

Automated mechanical transmission

Coordinated powertrain control Shift quality

作者简介: 廖承林, 1973 年出生, 博士后研究人员。主要研究方向为多能源动力总成控制。

E-mail: liaochenglin@tsinghua.org.cn