

# 并联式混合动力新型有源传动装置动力换挡特性

吴海康<sup>1,2</sup>, 钟再敏<sup>1</sup>, 余卓平<sup>1,2</sup>, 王心坚<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

**摘要:** 开发了一种基于定轴齿轮传动方式并集成电机的新型混合动力车用有源传动装置, 通过自动切换机构, 电机可选择性地与变速器输入轴或输出轴建立动力传递路径。一方面当电机与输入轴连接时, 可利用档位速比实现高效驱动; 另一方面在换挡时, 电机可通过短时与输出轴连接, 实现无动力中断换挡。完成了 EMT(electrified manual transmission)的动力性匹配设计, 并通过仿真分析详细说明了 EMT 实现无动力中断换挡的过程。结合第一轮样机的开发及台架试验, 考察了换挡期间电机维持车辆动力不中断的能力。

**关键词:** 混合动力; 有源传动装置; 动力中断; 动力切换

**中图分类号:** U463.2

**文献标志码:** A

## Power Shift Feature Research of a Novel Active Transmission for Parallel Hybrid Vehicle Use

WU Haikang<sup>1</sup>, ZHONG Zaimin<sup>1</sup>, YU Zhuoping<sup>1,2</sup>, WANG Xinjian<sup>1,2</sup>

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A novel active transmission for parallel hybrid vehicle use was developed, which was based on the fixed axis gear and integrated the driving motor. Through automatic switch actuator, the motor could connect to the input or output shaft selectively. The former assured that, it could work efficiently by using gear ratios properly. During gear shift, it could supply wheels with driving force continuously by temporarily connecting to the output shaft. Dynamic property matching design of Electrified Manual Transmission (EMT) was accomplished. Through simulation, the way, how EMT realized gear shift process without power interrupt, was explained. Based on the development of the first prototype and test bench experiment, the ability of motor to maintain driving force uninterrupted during gear shift process was analyzed.

**Key words:** hybrid electric vehicle; active transmission; power interrupt; power switch

对于混合动力车用传动系而言, 将电机与变速器集成成为一个整体是一条可行的技术路线<sup>[1]</sup>。集成部件一般包含 3 个端口, 即发动机动力输入端口, 电功率转换端口以及动力输出端口, 主要融合了电驱动、电控以及机械传动三大技术领域, 可将其称为有源传动装置。

相比 AMT(automatic manual transmission), 混合动力车用传动系拥有多个动力源(发动机以及驱动电机), 如果在档位切换时适当利用驱动电机向轮边提供动力, 则可从根本上解决现有 AMT 换挡过程中所存在的动力中断问题。目前, 根据电机位置不同, 并联混合动力车用定轴式有源传动装置主要包括两大类: 电机与变速器输入轴动力耦合(P2 概念)以及电机与变速器输出轴动力耦合(P3 概念)。文献[2]以一款典型的大功率两轴式 4 档 MT(manual transmission)为基础, 在离合器与输入轴之间增加了电机, 配合自动操纵机构, 构成了一款强混城市公交车用变速器。文献[3]以一款 5 档 AMT 为原型, 在发动机与离合器之间增加了 ISG(integrated starter generator)电机构成了一款轻混乘用车用变速器。二者均属于 P2 概念, 不能解决换挡过程中存在的动力中断问题<sup>[2-3]</sup>, 并且由于电机较大的转动惯量, 换挡过程中, 电机需要进行有源同步。文献[4]通过一行星排将电机动力传递至 AMT 的输出轴, 提出了电动变速驱动单元 E. T. Driver 的概念, 虽然可从根本上解决换挡过程中存在的动力中断问题, 但是由于电机转速必须覆盖整个车速范围, 电机只能以较小的降速比与车轮保持动力连接, 直接导致电机可向轮边提供的驱动力功率有限, 电

收稿日期: 2013-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51075301)

第一作者: 吴海康(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为新能源汽车传动系统控制。E-mail: wuhaikang2009@163.com

通讯作者: 钟再敏(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新能源汽车传动系统控制。

E-mail: zm\_zhong@tongji.edu.cn

机工作效率偏低,并且不具备停车充电功能<sup>[5-6]</sup>。

文献[7]以纵置 DCT(dual clutch transmission)为基础,发动机输出动力通过输入轴 1,中间轴 1 以及奇数轴档位齿轮传递给输出轴;电机输出动力通过输入轴 2,中间轴 2 以及偶数轴档位齿轮传递给输出轴;中间轴 1,2 之间由一对桥接齿轮旋转连接。混合动力模式下,为了实现无动力终端换挡,两个动力源需要交替向轮边提供动力。

本文首次提出了一种结构新颖紧凑,具有较好可行性的车用有源传动装置,简称 EMT(electrified manual transmission),其主要技术特征是电机动力传递路径可切换。仿真分析和试验结果表明,EMT 能充分利用驱动电机弥补现有 AMT 存在的技术缺陷,具有较高的应用推广价值。

### 1 EMT 工作原理

EMT 工作原理如图 1 所示,发动机(E)通过离合器(C)与输入轴(A<sub>I</sub>)旋转驱动连接,通过档位速比( $i_1, i_2, i_3, i_4$ )以及档位同步器(S<sub>1/2</sub>, S<sub>3/4</sub>)将动力可选地传递给输出轴(A<sub>O</sub>)。电机(M)利用电机输入轴同步器(S<sub>wI</sub>)以速比  $i_1$  建立至输入轴动力传递路径速。同样电机利用电机输出轴同步器(S<sub>wO</sub>)以速比  $i_1 \times i_0$  建立至输出轴动力传递路径速。发动机以及电机输出的动力最终将通过主减速齿轮副( $i_{diff}$ )以及差速器(D)传递给车轮(W)。

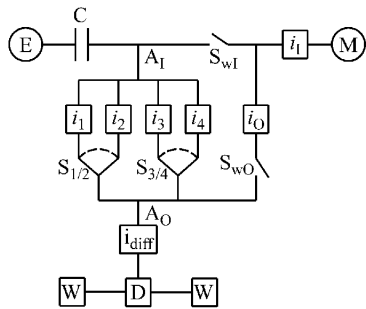


图 1 EMT 的工作原理

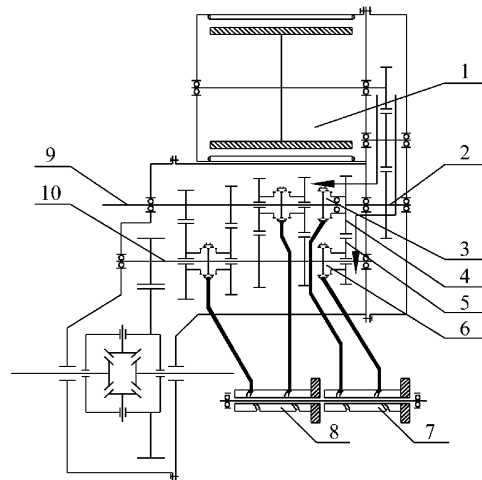
Fig.1 Working principle of EMT

EMT 有 4 种常用的工作模式:①EV-SI(electric vehicle-shaft input)模式,电机与输入轴连接,以纯电动方式驱动车辆前进;②EV-SO(electric vehicle-shaft output)模式,电机与输出轴连接,以纯电动方式驱动车辆前进,在以上两种工作模式中,发动机关机,离合器分离;③HEV-SI(hybrid electric vehicle-shaft input)模式,发动机与电机同时通过输入轴以混动方式驱动车辆前进;④HEV-SO(hybrid electric

vehicle-shaft output)模式,发动机通过输入轴,而电机通过输出轴,以混动方式驱动车辆前进。

对于 EV-SO 模式而言,由于要求在整个车速范围内电机始终与输出轴保持连接,导致电机至输出轴的速比偏小,电机既无法向轮边提供足够的驱动力,又无法长时间工作在高效区,因此当车辆处于纯电动模式时采用 EV-SI 模式较为合理。HEV-SI 和 HEV-SO 两种模式分别对应目前常见的基于 AMT 实现的并联式有源传动装置方案 P2/P3,其优缺点如前文所述。通过电机输入轴/输出轴同步器的切换,文中所述 EMT 能够可选地同时实现 P2/P3 方案的功能,这是其最大的技术特征。具体讲,车辆稳态行驶过程中,EMT 采用 HEV-SI 模式实现 P2 的功能,当要求进行档位切换时,EMT 首先切换至 HEV-SO 模式,利用电机至输出轴的动力传递路径持续为轮边提供动力,在完成无动力中断换挡后,EMT 将切换回 HEV-SI 模式,车辆重新回到稳定行驶状态。

图 2 所示为 EMT 样机结构。由于考虑到电机功率较大,样机并没有采用轻混 HEV 中常见的发动机、电机与变速器 3 者在同一轴线上串联布置的方式,而是将电机与变速器以横置方式在车辆前后方向布置,即将电机布置在发动机散热器与变速器之间,可最大限度利用发动机舱的空间,特别适合布置在小型乘用车上。其变速器的结构借鉴了传统中间轴式手动变速箱,原本用于传递发动机输出的动力,原本



1. 电机;2. 电机中间轴;3. 电机输入轴同步器;4. 5 档主动齿轮;5. 5 档从动齿轮;6. 电机输出轴同步器;7. 电机动力切换凸轮;8. 档位切换凸轮;9. 输入轴;10. 输出轴

图 2 EMT 样机的结构

Fig.2 Structure of EMT prototype

的中间轴现用于向轮边传递动力,而原本的直接档同步器现作为电机输入轴同步器 3 用于可选地将电机与输入轴连接,增加电机输出轴同步器 6 用于可选地建立将电机与输出轴连接.需要特别说明的是,若同时结合电机输入轴/输出轴同步器 3/6,将构成输入轴与输出轴之间的第 5 个档位,这是该样机结构的优势.

## 2 基本输入/输出特性计算

EMT 样车的基本参数如表 1 所示.

表 1 EMT 样车的基本参数

Tab.1 Basic parameters of prototype vehicle

参数	数值
整车质量/kg	1 884
滚阻系数	0.012
风阻系数	0.31
迎风面积/m <sup>2</sup>	2.226
车轮半径/m	0.3
EV 模式设计最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	100
HEV 模式设计最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	180

注:整车质量是在原车质量 1 300 kg 的基础上增加电池/电机质量以及 375 kg 乘员质量计算得出.

要求 HEV 模式在整个车速范围内,EMT 都能够从 HEV-SI 模式切换至 HEV-SO 模式,并且初定主减速比为 4.3,则电机至输出轴传动路径速比  $i_t \times i_o = 1.3$ ,其中  $i_o = 0.78$ ,即 5 档速比为 0.78.由于 EV-SI 模式下换挡过程存在动力中断,为减少档位切换频度,考虑只使用变速箱的 1/2/3 档.当变速箱处于 3 档,并且电机达到最高转速时,车速需达到 EV 模式最高车速 100 km·h<sup>-1</sup>,因此 3 档速比为 1.3.按照等比数列的规则,初定 1 档速比为 3,2 档速比为 2,4 档速比为 1.

EMT 所用发动机为直列式 4 缸汽油机,额定功率为 80 kW,最高转速为 6 000 r·min<sup>-1</sup>,所用电机为永磁同步电机,额定功率为 30 kW,峰值功率为 60 kW,同步转速为 6 000 r·min<sup>-1</sup>,最高转速为 9 000 r·min<sup>-1</sup>.为保证 HEV-SI 模式下,发动机与电机同时达到最高转速,电机至输入轴传动路径速比  $i_t = 1.5$ ,因此,输入轴最大转矩/功率特性如图 3,4 所示.

由于在低速区电机具有较好的功率输出特性,因此即使 EMT 的 1 档速比适当地小于传统 AMT 的 1 档速比,同样可以获得较为平顺的起步性能.

由图 5 可知 EV-SI 模式下电机凭借额定功率几乎能够使得车辆在坡度为 10% 的坡道上实现起步,

凭借峰值功率几乎能够使其在坡度为 20% 的坡道上实现起步. EV-SI 模式下轮边驱动功率分析如图 6 所示.由图 6 可知当车速达到 35 km·h<sup>-1</sup>时,电机便开始工作在恒功率区,保证了车辆的动力性.

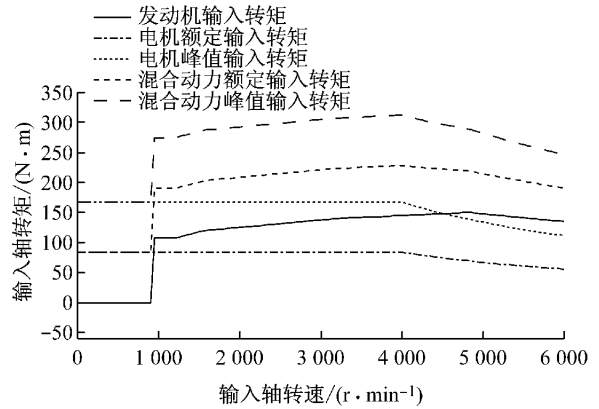


图 3 HEV-SI 模式下最大输入转矩特性分析  
Fig.3 Maximal input torque feature under HEV-SI mode

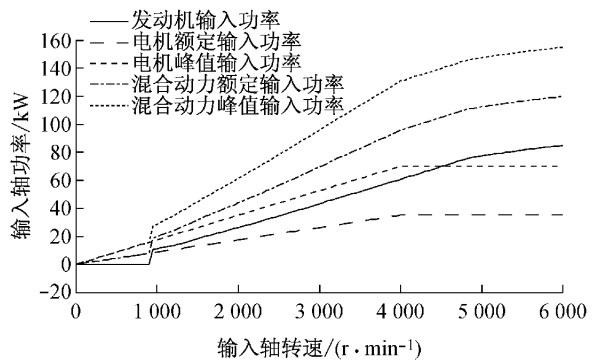


图 4 HEV-SI 模式下最大输入功率特性分析  
Fig.4 Maximal input power feature under HEV-SI mode

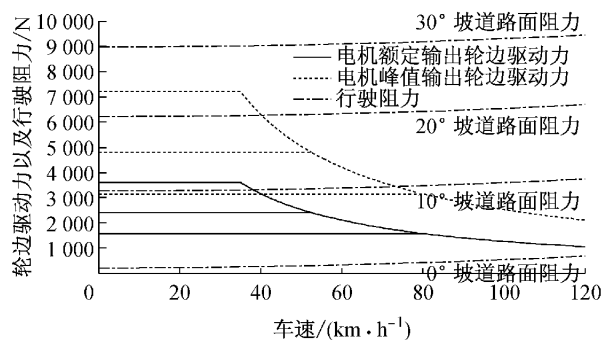


图 5 EV-SI 模式下各档位轮边驱动力分析

Fig.5 Driving force at wheel under EV-SI mode

由图 7 可知 HEV-SI 模式下电机凭借峰值功率配合发动机便可使车辆在 30% 的坡道上实现起步. HEV-SI 模式下轮边驱动功率分析如图 7 所示,由图 8 可知当车速达到 35 km·h<sup>-1</sup>时,电机凭借峰值功

率便可使车辆大约具备 140 kW 的后备功率,其动力性是相当可观的.

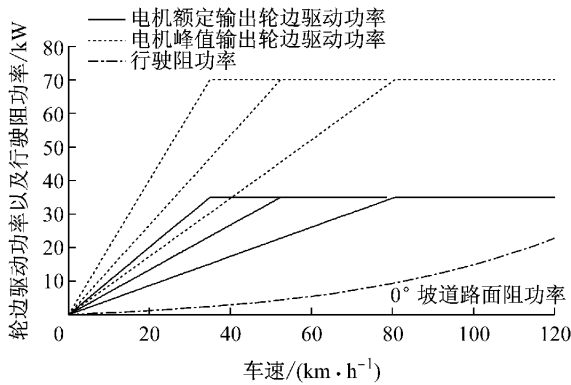


图 6 EV-SI 模式下各档位轮边驱动功率分析  
Fig.6 Driving power at wheel under EV-SI mode

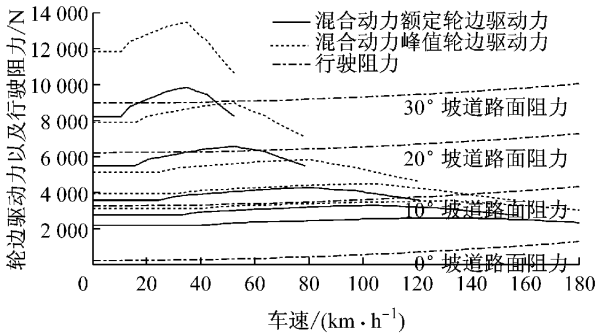


图 7 HEV-SI 模式下各档位轮边驱动力分析  
Fig.7 Driving force at wheel under HEV-SI mode

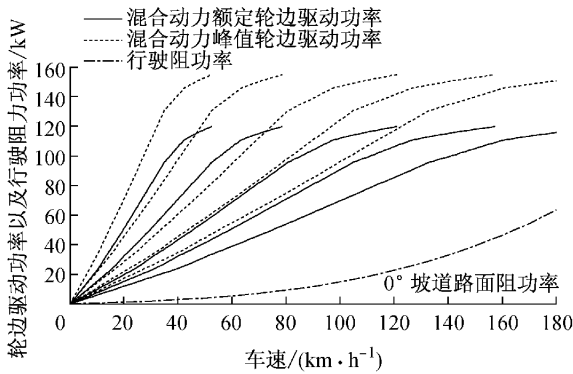


图 8 HEV-SI 模式下各档位轮边驱动功率分析  
Fig.8 Driving power at wheel under HEV-SI mode

### 3 动力中断问题的改善

#### 3.1 换挡期间电机补偿轮边动力中断的能力

由于电机至输出轴动力传递路径的速比仅为 1.3,因此需要计算在离合器分离,变速箱进行档位切换期间,电机能否向轮边提供足够的驱动力.以标准工况进行考察.常用的标准工况有欧洲的 NEDC

(New European Driving Cycle)以及美国的 UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule),参见图 9~12,前者通过交替使用低速城市工况以及高速城郊工况对车辆进行综合考核,其最高车速达 120 km·h<sup>-1</sup>,属于稳态工况.后者更多地使用剧烈变化的目标车速曲线来模拟车辆在市区内行驶过程中频繁的启停工况,属于动态工况.

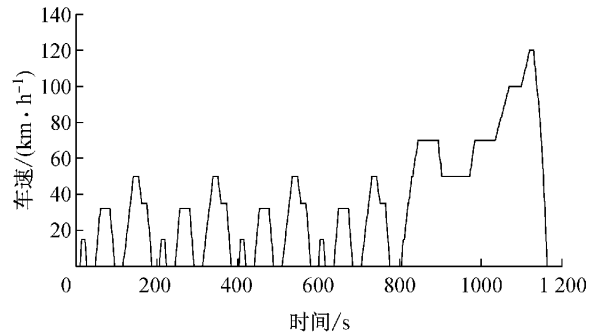


图 9 NEDC 工况  
Fig.9 NEDC cycle

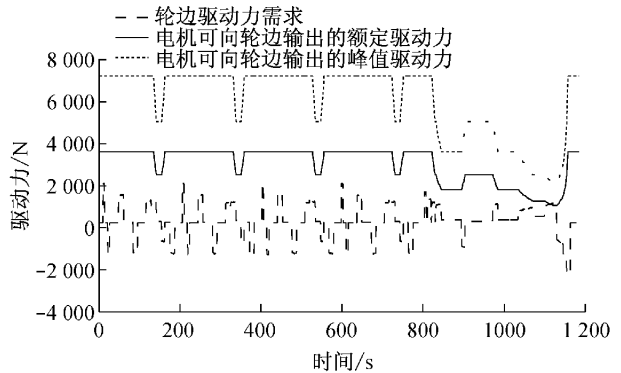


图 10 HEV-SO 模式下电机补偿换挡期间动力中断的能力 (NEDC 工况)  
Fig.10 Ability of electric motor to reduce power interrupt during gear shift under HEV-SO mode (at NEDC cycle)

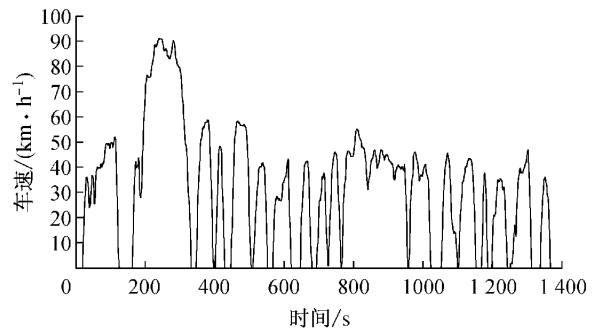


图 11 UDDS 工况  
Fig.11 UDDS cycle

由图 10 可知,在 NEDC 工况下,电机凭借额定功率几乎能够全工况范围内在档位切换期间向轮边提

供足够的驱动力,仅仅在车辆从  $110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  向  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  目标车速加速过程中不能完全满足需求,但这完全可以通过短时部分启用峰值功率来解决。

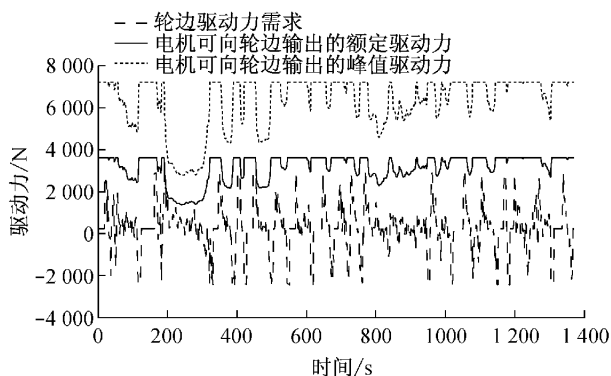


图 12 HEV-SO 模式下电机补偿换档期间动力中断的能力(UDDS 工况)

Fig. 12 Ability of electric motor to reduce power interrupt during gear shift under HEV-SO mode (at UDDS cycle)

由图 12 可知,在 UDDS 工况下,电机凭借额定功率便能够在全工况范围内满足需求。

### 3.2 无动力中断换档过程仿真分析

为实现 HEV 模式下的无动力中断换档过程,需要将电机从与输入轴动力耦合切换至与输出轴动力耦合,在电机向轮边持续提供驱动力时,完成档位切换,之后需要重新将电机切换回与输入轴动力耦合,具体过程可参见表 2。

表 2 无动力中断换档子过程划分

Tab.2 Phases division of gear shift process without power interrupt

过程	说明
过程 1	增加发动机输出转矩,减少电机输出转矩至 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,理想情况下发动机输出转矩增加量正好可以弥补电机输出转矩减少量,从而使得车辆的加速度保持恒定.当电机输出转矩减少到 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 后,电机与输入轴脱离连接
过程 2	通过主动调速,使得电机转速从与输入轴适应变化到与输出轴适应
过程 3	减少电机的目标扭矩输出至 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,电机与输出轴连接
过程 4	增加电机输出转矩,减少发动机输出转矩至 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,离合器分离
过程 5	完成档位切换
过程 6	通过主动调速,将发动机转速调整到与输入轴适应,离合器结合
过程 7	增加发动机输出转矩,减少电机输出转矩至 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,电机与输出轴脱离连接
过程 8	通过主动调速,使得电机转速从与输出轴适应变化到与输入轴适应
过程 9	减少电机输出转矩至 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,电机与输入轴连接
过程 10	按照能量管理策略的要求,恢复发动机以及电机输出转矩

仿真过程主要基于 Matlab/Simulink 中的基本模块和物理建模工具箱 Simscape 中的 Sim/Driveline 子工具箱以及 Stateflow 工具箱等完成.整个仿真过程模拟的是车辆全油门加速以及 EMT 连续换档的过程,且电机使用了  $60 \text{ kW}$  的峰值功率,结果见图 13~15。

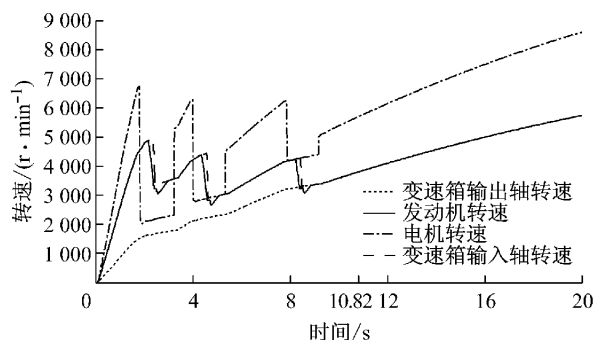


图 13 全油门加速过程的转速变化

Fig. 13 Speed variation of full gaspedal acceleration

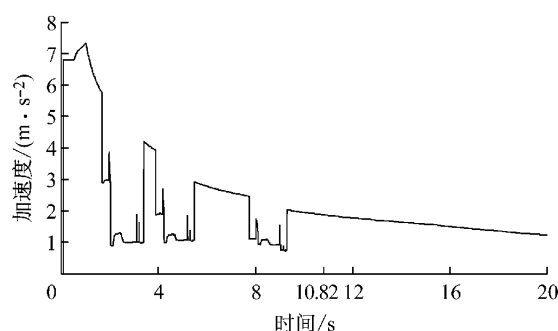


图 14 全油门加速过程的加速度变化

Fig. 14 Acceleration variation of full gaspedal acceleration

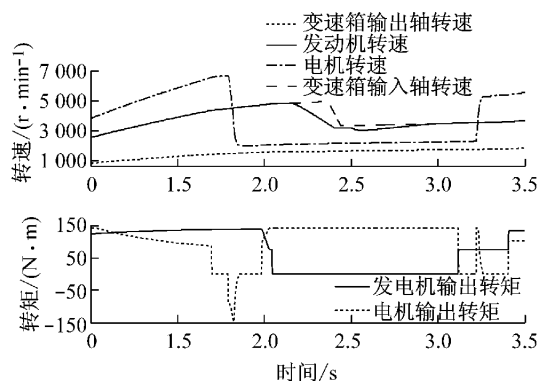


图 15 1 档换 2 档时的转速转矩变化

Fig. 15 Speed variation of 1<sup>st</sup> to 2<sup>nd</sup> gear shift process

由图 13,14 可知, $0 \sim 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  加速时间为  $10.82 \text{ s}$ ,在换档过程中,由于  $i_0$  偏小,因此单靠电机

无法完全弥补司机对轮边驱动力的需求,但在换挡过程中车辆加速度始终为正值,车速始终处于上升过程中.由图 15 可知,1 档换 2 档过程持续了近 1.70 s.

4.1 无动力中断换挡过程试验研究

第 1 轮 EMT 样机在动力总成试验台架上实现了无动力中断换挡功能.试验台架布置如图 16,17 所示.试验台架包括 3 个测功机,Dyno1 作为动力电机,用于模拟发动机动力输出特性,通过离合器与 EMT 输入轴连接.Dyno2 和 Dyno3 作为负载电机,用于模拟车辆行驶阻力,分别于 EMT 的两根半轴连接.集成驱动控制单元 PCU 通过控制相应的自动切换机构实现 EMT 档位以及电机动力传递路径切换功能,同时驱动电机运行.

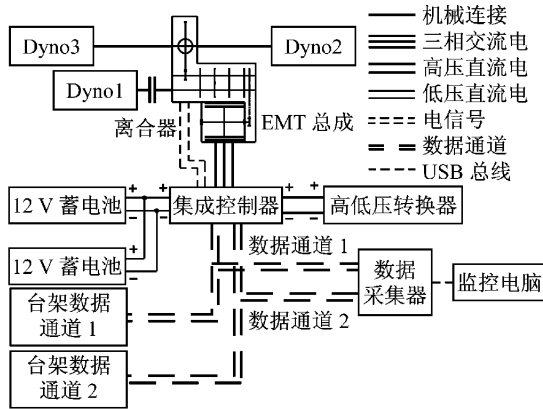


图 16 台架试验电气原理图

Fig.16 Electrical schematic diagram of test bench experiment

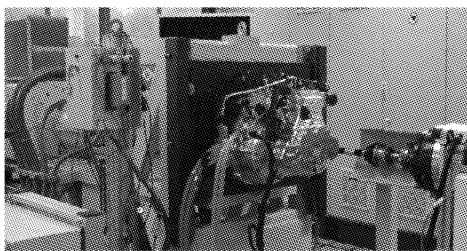


图 17 台架试验现场

Fig.17 Test bench experiment field

试验结果如图 18 所示,当车速达到  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的时候,进行了 1 档换 2 档的无动力中断换挡试验.试验结果统计见表 3,其中 N 表示电机既不与输入轴连接,也不与输出轴连接.

整个无动力中断换挡过程持续 1.81 s,略长于图 15 所示仿真结果,主要是由于试验过程中未取消对电机功率以及电机输出转矩变化速率的限值,因此电机调速以及改变输出转矩时间较长.对于使用

X-Y 型选换挡执行机构的 AMT 而言,1 次档位切换动作包括摘档、选档以及挂档 3 个子动作.虽然 EMT 采用圆柱凸轮作为档位切换机构,取消了选档,但需额外完成 2 次电机位置切换以及 2 次电机调速.因此即使对控制算法作进一步的优化,EMT 完成 1 次换挡至少比 AMT 多出  $120 \text{ ms}$ (电机位置切换) +  $80 \text{ ms}$ (电机调速)  $\times 2 = 280 \text{ ms}$ ,由此可知将上述无动力换挡过程应用于动力中断感觉十分明显的 1/2 档切换过程可能具备较高的实际应用价值,而不适合被应用在动力中断感觉不明显的高档切换过程.

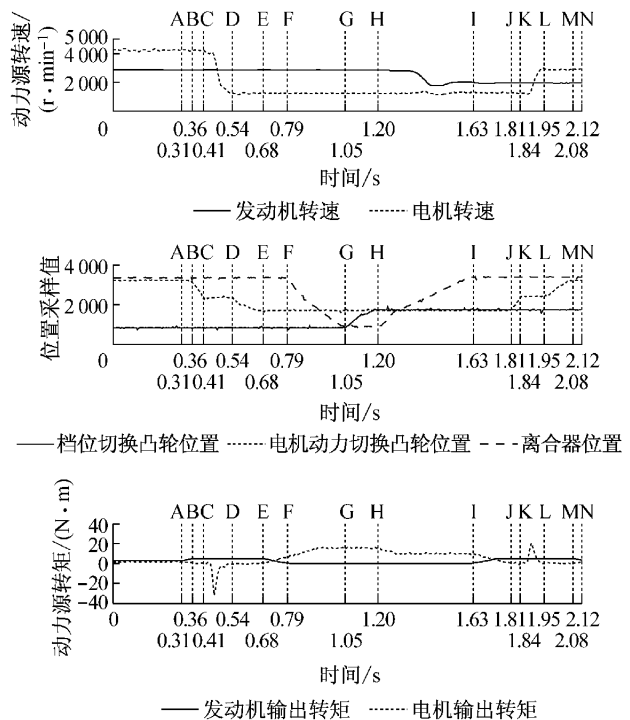


图 18 1 档升 2 档无动力中断换挡试验结果

Fig.18 Experiment results of 1<sup>st</sup> to 2<sup>nd</sup> gear shift process without power interrupt

表 3 试验结果统计

Tab.3 Statistics of experimental results

过程	说明	持续时间/ms
$t_A \sim t_B$	动力源转矩互补	50
$t_B \sim t_C$	电机动力切换凸轮位置:SO→N	50
$t_C \sim t_D$	电机调速	130
$t_D \sim t_E$	电机动力切换凸轮位置:N→SI	140
$t_E \sim t_F$	动力源转矩互补	110
$t_F \sim t_G$	离合器分离	260
$t_G \sim t_H$	档位切换凸轮位置:1 档→2 档	150
$t_H \sim t_I$	离合器结合	430
$t_I \sim t_J$	动力源转矩互补	180
$t_J \sim t_K$	电机动力切换凸轮位置:SI→N	30
$t_K \sim t_L$	电机调速	110
$t_L \sim t_M$	电机动力切换凸轮位置:N→SO	130
$t_M \sim t_N$	动力源转矩互补	40

## 4 结语

从对 EMT 工作原理以及无动力中断换挡过程的分析和实验结果可以看出,虽然 EMT 具有较明显的技术优势,但其无动力中断换挡过程的步骤比较复杂,因此仅适合应用在动力中断问题较为突出的低档切换过程中,而不适合应用在高档切换过程中。

### 参考文献:

- [1] Zeraouli, Benbouzid M, Diallo M. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(6): 1756.
- [2] 林枫, 吴森, 曹正策, 等. 混合动力电动城市公交客车控制策略[J]. *武汉理工大学学报: 信息与管理工程版*, 2003, 25(6): 179. LIN Feng, WU Sen, CAO Zhengce, *et al.* Control strategy of the hybrid electric city bus[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering*, 2005, 29(3): 179.
- [3] 丁李辉. 基于 AMT 的轻度混合动力汽车换挡品质研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007. DING Lihui. Study on shift quality of mild hybrid electric vehicle equipped with automatic manual transmission[D]. Chongqing: College of Mechanical Engineering of Chongqing University, 2007.
- [4] 董悦航. 基于 AMT 的混合动力汽车电动变速驱动单元(E. T. Driver)控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. DONG Yuehang. Research on control strategy of E. T. Driver based on AMT in parallel hybrid electric vehicles[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [5] 杜波, 秦大同, 段志辉, 等. 新型并联式混合动力汽车模式切换协调控制[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(6): 739. DU Bo, QIN Datong, DUAN Zhihui, *et al.* Coordinated control for mode-switch of a new parallel HEV[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(6): 739.
- [6] Hiroshi Kuroiwa, Naoyuki Ozaki, Takashi Okada, *et al.* Next-generation fuel-efficient automated manual[J]. *Hitachi Review*, 2004, 53(4): 205.
- [7] 伊顿公司. 混合动力传动系统: 中国, CN1656330A[P]. 2005-08-17. Eaton Corporation. Hybrid powertrain system: China, CN1656330A[P]. 2005-08-17.
- [8] QIAN Lili, WANG Shuzhong, TANG Xingying. Experimental study on hydrothermal treatment of municipal sewage sludge[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 448/453: 693.
- [9] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001. SUN Xuexin. Combustion test technology and method for coal-fired boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [10] XUE Xiangyu, WANG Huan, SONG Xueding, *et al.* Leaching characteristics of chars from five wastes pyrolysis process[C/CD] // 14th International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, [s. n.], 2013.
- [11] 杨晓奕, 蒋展鹏. 湿式氧化处理剩余污泥反应动力学研究[J]. *上海环境科学*, 2004, 23(6): 231. YANG Xiaoyi, JIANG Zhanpeng. A study on kinetic model of waste sludge treatment by wet air oxidation[J]. *Shanghai Environmental Science*, 2004, 23(6): 231.
- [12] 李建新, 严建华, 金余其, 等. 生活垃圾焚烧飞灰重金属特性分析[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2004, 38(4): 490. LI Jianxin, YAN Jianhua, JIN Yuqi, *et al.* Characteristic analysis of heavy metals in MSWI flyash[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2004, 38(4): 490.
- [13] Yoshida T, Antal M. Sewage sludge carbonization for terra preta applications[J]. *Energy Fuels*, 2009, 23(11): 5454.
- [14] Kim K, Fujie K, Fujisawa T. Feasibility of recycling residual solid from hydrothermal treatment of excess sludge[J]. *Environmental Engineering Research*, 2008, 13(3): 112.

### (上接第 1885 页)

- [2] 胡雨燕, 陈德珍. 水热条件下磷酸盐稳定垃圾焚烧飞灰的研究[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(1): 121. HU Yuyan, CHEN Dezhen. Study of incineration fly ash stabilization with phosphate under hydrothermal condition[J]. *Journal of Building materials*, 2008, 11(1): 121.
- [3] 孙雪萍, 王安亭, 李新豪, 等. 热水解法处理污泥过程中重金属的迁移规律[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(17): 66. SUN Xueping, WANG Anting, LI Xinhao, *et al.* Migration of heavy metals in sludge treatment by thermal hydrolysis process[J]. *China Water and Wastewater*, 2010, 26(17): 66.
- [4] 王定美, 徐荣险, 秦冬星, 等. 水热碳化终温对污泥生物炭产量及特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(10): 1775. WANG Dingmei, XU Rongxian, QIN Dongxing, *et al.* Influence of final hydrothermal carbonization temperatures on the yields and characteristics of sludge biochars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(10): 1775.
- [5] Appels L, Degève J, Bruggen B, *et al.* Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(15): 5743.
- [6] 杨琦, 文湘华, 王志强. 湿式氧化处理城市污水厂污泥的研究[J]. *中国给水排水*, 1999, 15(7): 4. YANG Qi, WEN Xianghua, WANG Zhiqiang. Study of wet air oxidation process for treating waste sludge from municipal Wastewater Treatment Plant[J]. *China Water and Wastewater*, 1999, 15(7): 4.
- [7] Kobayashi N, Nomura S, Fujimura Y, *et al.* Effect of