

# 基于电力测功机的电动车辆直驱负载模拟技术研究

靳建波, 卜树峰, 李永军, 李明勇, 柳泓莹

(中国北方车辆研究所 车辆传动重点实验室, 北京 100072)

**摘要:** 以建立的电力测功机—永磁同步电机为试验平台, 开展了电动车辆直驱负载模拟技术研究; 首先, 按照车辆负载转矩、转速逆向传递思路, 应用 MATLAB/Simulink 模块建立车辆直驱的整体负载模型; 其次, 在城市道路工况 ECE15 下, 通过车辆负载逆向仿真方法, 得到驱动电机输出端的负载扭矩和转速, 进而为试验台上应用电力测功机实现车辆直驱负载的模拟提供数据文件; 最后, 通过仿真分析实现了转速、转矩对工况需求的动态跟踪, 验证了负载模型的正确性; 并进一步对比分析仿真数据与试验数据, 说明该试验模拟系统可以实现车辆直驱负载的模拟。

**关键词:** 电力测功机—永磁同步电机; 负载模拟; 逆向模型; 仿真分析

## Research on Load Simulation of Electric Vehicle Straight— Driving Based on Electric Dynamometer

Jin Jianbo, Bu Shufeng, Li Yongjun, Li Mingyong, Liu Hongzhe

(Laboratory of Vehicle Transmission Science and Technology, Beijing 100072, China)

**Abstract:** In order to establish the power dynamometer — permanent magnet synchronous motor as the test platform, the electric vehicle Straight— Driving load simulation technology research was carried out. Firstly, according to the reverse transmission ideas of the vehicle load speed and torque, the application of MATLAB/Simulink module to establish the vehicle Straight— Driving load model. Secondly, under the urban road condition ECE15, the load speed and torque of the output end of the vehicle drive motor are obtained by the vehicle load reverse simulation method, and the data file is provided for the simulation of the vehicle Straight—Driving load on the test bench. Finally, the dynamic tracking of the speed and torque demand is realized by simulation analysis, and the correctness of the load model is verified. It is proved that the simulation system can realize load simulation of vehicle straight—driving by comparing with the simulation data and experiment data.

**Keywords:** power dynamometer—permanent magnet synchronous motor; load simulation; reverse model; simulation analysis

## 0 引言

进入 21 世纪, 由于能源危机的持续加深、环境污染的不断加剧, 寻找清洁、无污染的车用燃料和设计污染小的车辆和高效率的传动系统已成为世界各大汽车企业可持续发展的战略选择。各大汽车企业基本已经建立了具有自主知识产权的新能源车辆动力传动系统技术研发平台, 这推动了新能源车辆及其传动系统的飞速发展<sup>[1]</sup>, 其中以电传车辆的发展和应用尤为突出。为了能更好的对电动车辆动力传动系统进行分析、设计和匹配, 需对电动车辆的动态负载进行台架模拟, 开展车辆负载模拟技术研究。

目前, 国内对负载模拟的研究主要集中在测功机稳态加载方面, 对于动态负载的模拟和加载一般采用近似的方法, 只是实现了某些典型特性的模拟。这在于国内进行交流电力测功机研究和制造的单位很少, 这限制了试验台的应用范围, 也限制了交流电传动的发展。另一方面, 由于国内对测功机研制能力不足, 以及国外测功机进入中国市场, 导致了现在以交流电力测功机为核心的动力与传动装置的技术研究和测试设备开发能力 70% 以上的市场都被德国、奥地利等大公司垄断。

国外的研究主要集中在测功机对机械负载进行模拟和加载方面, 以及运用测功机进行先进控制算法的理论研究, 已经基本实现了对交流电力测功机的自动控制 and 动态加载。目前许多学者利用电力测功机对车辆行驶道路负载进行模拟, 文献 [2-3] 用直流电机作为测功机, 对负载系统的控制提出了 3 种方案来模拟车辆行驶负载; 文献 [4-5] 应用电力测功机模拟车辆行驶时的负载惯量, 对负载模拟器的两个基本控制策略进行对比; 文献 [6] 应用测功机的控制策略对车辆行驶负载动态特性进行准确模拟, 并将试验结果与仿真结果进行对比; 文献 [7] 讨论了测功机系统的转动惯量、粘性摩擦系数对转速和转矩的影响; 文献 [8] 在对测功机进行模拟控制的基础上, 开展了驱动电机 PI 控制器和 PI 估计器的对比分析。通过以上测功机及其控制系统的研究, 可以实现车辆行驶道路负载的动态模拟, 也为车辆动力传动系统动力性、经济性匹配及性能测试提供方法。

车辆负载模拟系统实质是一种转矩控制系统, 即应用电力测功机来模拟实际车辆上牵引动力装置的负载转矩, 有时也加入机械惯性装置。文中以交流电力测功机—永磁同步电机为试验平台, 通过把模型的仿真数据载入试验平台来模拟整车直驱负载, 从而实现了对动力装置运行负载的模拟。

## 1 试验台模型

基于驱动电机—负载电机试验平台的通用负载模拟方框结

收稿日期: 2017-08-17; 修回日期: 2017-10-23。

作者简介: 靳建波(1985-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事传动系统控制与试验方向的研究。

构图如图 1 所示,这也是所要研究的车辆直驶负载模拟的试验平台。通过控制负载电机,使其能够模拟出给定的车辆直驶负载。

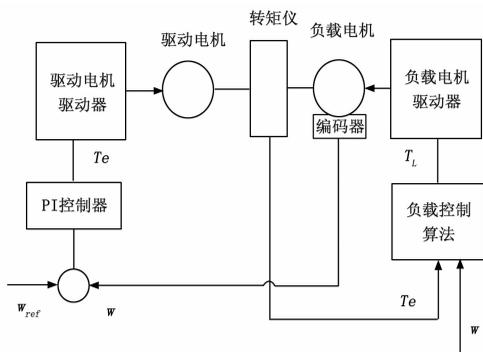


图 1 基于驱动电机-负载电机的控制方框图

对于通用的负载模拟,假设要模拟的目标负载输出端的转速为  $\omega_{em}$ , 转矩为  $T_{em}$ , 则目标负载系统的传递函数  $G_{em}$  为<sup>[9]</sup>:

$$G_{em} = \frac{\omega_{em}}{T_{em}} \quad (1)$$

又假设在实际的台架中,负载电机的输出转速为  $\omega$ , 负载电机的输出转矩为  $T_L$ , 则负载电机的传递函数  $G(s)$  可以表示为:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{T_L(s)} \quad (2)$$

而要使负载电机实现对目标负载的模拟,应该使

$$G_{em}(s) = G(s) \quad (3)$$

上式即为通用负载模拟的目标,其中负载转矩  $T_L$  为车辆直驶时的行驶阻力  $T_f$ , 可以表示为:

$$T_f = \frac{F_{\text{总}} \cdot R_{\text{轮}}}{i_{\text{总}} \cdot \eta_{\text{总}}} \quad (4)$$

式中,  $F_{\text{总}}$  为车辆受到的总的阻力;  $R_{\text{轮}}$  为车辆轮胎等效半径;  $i_{\text{总}}$  为汽车传动系总的传动比;  $\eta_{\text{总}}$  为传动系的总效率。

因此,应控制负载电机输出的转矩  $T_L$  等于车辆直驶时的负载转矩  $T_f$ , 所以:

$$T_L = T_f \quad (5)$$

对于车辆负载的模拟,一种方式是基于车辆传动系统的逆动力学模型,这种方式就是通过对负载电机的转矩控制实现车辆负载的模拟。基本原理就是通过测取试验台中电机的角速度,然后依据角速度和车辆的逆动力学模型计算出负载电机的转矩。

假设实际的驱动电机转矩和试验台驱动电机的转矩相同,可以得到负载电机控制的扭矩为:

$$T_L = \omega(s)(G_{em}^{-1}(s) - G^{-1}(s)) \quad (6)$$

其控制方框图如图 2 所示。

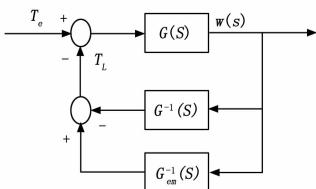


图 2 基于负载逆动力学模型的控制框图

在图 3 中,  $T_e$  是驱动电机的电磁转矩,  $T_L$  是负载电机的电磁转矩,  $\omega(s)$  是电机的角速度,  $G(s)$  是负载模拟试验平台的动力学模型,  $G_{em}^{-1}$  是车辆直驶逆动力学模型,  $T_e, \omega(s)$  可以认为是汽车直驶时,动力源输出的实际扭矩和角速度。

设  $J, B$  分别是驱动电机-负载电机平台的转动惯量和粘性摩擦系数,  $J_{em}, B_{em}$  分别是被模拟负载的转动惯量和粘性摩擦系数。则试验台可以表示为:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (7)$$

$$T_e = J_{em} \frac{d\omega}{dt} + B_{em}\omega \quad (8)$$

将式 (8) 式代入式 (7) 可以得到:

$$T_L = (J - J_{em}) \frac{d\omega}{dt} + (B - B_{em})\omega \quad (9)$$

进行拉式变换后可以得到传递函数为:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{(J - J_{em})s + (B - B_{em})} \quad (10)$$

## 2 整车直驶负载模型

为了对车辆直驶负载实现模拟,必须建立整车直驶的动力学模型。在车辆直驶负载的仿真中,应用后向仿真方法,可以更好的得到台架所需的数据。

对于电动车辆由于电机可以工作在零点转速,一般采用无离合器换挡的结构,即从发动机-变速箱-主减速器-轮胎-地面阻力的动力传递。由于汽车的负载主要来自于地面的阻力、风阻和惯性阻力,故在整个车辆直驶负载建模时,各个模块的模型不一定要很复杂,主要可以体现扭矩、转速和惯量在各个模块中传递即可<sup>[10]</sup>。另外,文中电动车辆的直驶负载模型主要研究纵向的动力传动,而忽略车辆在横向和垂直向的运动。

动力传递模型就是通过参考车速得到轮胎上的负载转矩和转速,之后把转矩向前逐级传递,同时将各个子模块的转速也向前传递,最后把整车直驶负载的转矩等效到电机的输出端,车速也经过各级传动比换算到驱动电机的输出轴上,以实现车辆直驶的负载输出。另外,在构建车辆直驶负载模型时,各子模块还应具有控制信号的传输功能,这反映了实际整车中信号控制的作用。

为实现汽车传动系统的高效建模,减少建模的工作量和提高模型质量,在进行传动系统和汽车行驶阻力模型设计时,将车辆传动系统转矩和转速按照逆向传递的思路进行建立。在 MATLAB/Simulink 中建立车辆直驶负载模型<sup>[11]</sup>,具体的模型如图 3 所示。

图 3 中主要由工况模型、整车阻力模型、车轮模型、主减速器模型和变速器模型组成。工况车速经过车阻力和传动系统最后得到电机输出端的转矩和转速;而换挡控制模块,根据车速的大小,控制变速器传动比的输出,实现对变速器挡位的控制。

## 3 仿真分析

车辆直驶负载模型的仿真是依据给定的参考车速,通过车辆负载逆向模型,实现转速、扭矩的动力传递,从而仿真得到驱动电机输出端的负载扭矩和转速,进而为试验台上应用测功机实现车辆直驶负载的模拟提供数据文件。下面以 ECE15 和 UDSS 工况为模型输入车速,开展负载模型仿真分析。

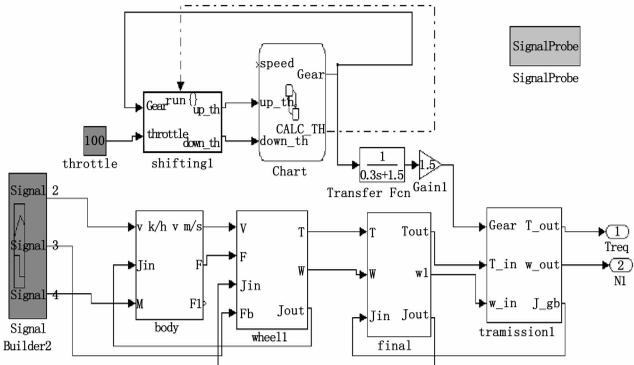


图 3 整体负载模型

3.1 动态跟踪

在 ECE15 工况和整车参数下 (如表 1), 通过模型仿真, 可以得到车辆驱动电机负载的转速和转矩, 如图 4 所示。其中 (a) 图表示车辆加速度的变化曲线, 图 (b) 表示负载转速的变化曲线, (c) 图表示负载转矩的变化曲线。

表 1 整车参数

整车参数	整车整备质量/kg	10 000
	总质量/kg	12 200
	迎风面积/m <sup>2</sup>	6.96
	空气阻力系数	0.5
	附着系数	0.75
AMT 参数	各档位传动比	I : 5.42、II : 3.5、III : 1.75、IV : 1.0、V : 0.7
主减速器参数	主减速比	5.286
轮胎参数	车轮半径/m	0.5
	滚动阻力系数	0.015

图 4 种的 3 个图形是在同一个时间轴上的变化情况, 分析可得: 1) 在停车阶段, 由于 ECE15 工况参考车速为零, 电机负载的转矩和转速都是零; 2) 在加速阶段, 由于 ECE15 工况下车辆加速度是阶跃变化的, 并不是一个连续的变化过程, 这样会使负载转速、转矩出现突变; 3) 在恒定加速阶段, 负载转速以一定的角加速度逐渐的升高, 由于负载转矩等于车辆的阻力转矩加上惯性阻力, 而惯性阻力矩变化相对于阻尼力矩的变化较大, 所以负载转矩表现为一个突变或者斜率很大的转矩升高; 4) 在车速恒定阶段, 负载转速维持在一个恒定的转速范围内不变, 而负载转矩由于车辆的加速度为零, 会有一个突然的降低, 但是由于这是的汽车的阻尼力 (包括滚动阻力、风阻等) 不为零, 所以电机需要输出一定的力矩在克服这些阻力, 以维持车辆的匀速运动。

通过以上的分析可以知道该模型可以实现对工况的动态跟踪, 也模拟了实际车辆的运行状态。

3.2 稳定性

在 UDDS 工况下, 结合表 1 的整车参数对模型的动态性和稳定性进一步分析。图 5 为 UDDS 工况下仿真的负载转矩和工况车速的关系变化图, 图 6 为 UDDS 工况下仿真的负载转速和工况车速的关系变化图。

图 5 分析可知, 随着整车工况的不断变化负载模型的输出转矩也呈现出不断的变化, 变化趋势与车速基本一致。对比车

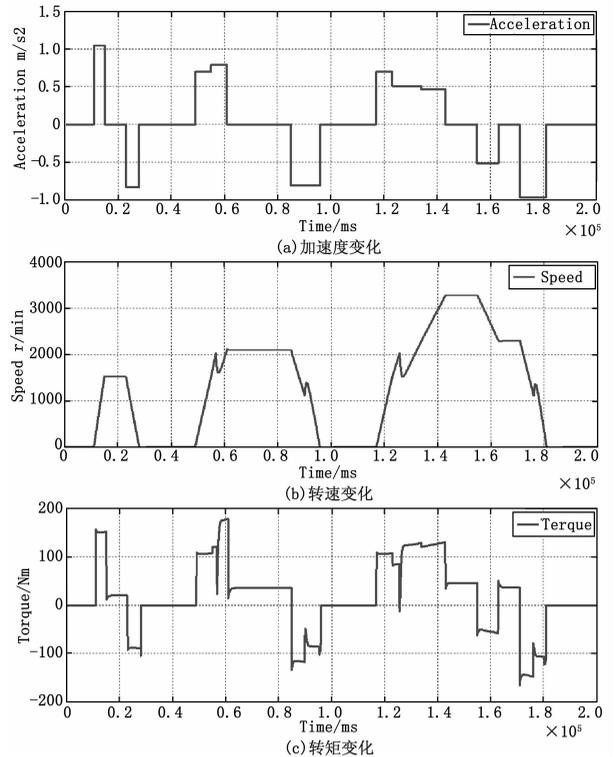


图 4 ECE15 工况下负载转速、转矩变化图

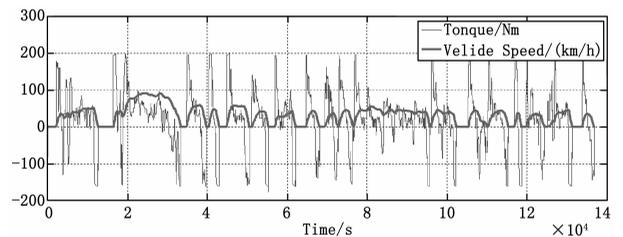


图 5 UDDS 工况下负载转矩和车速

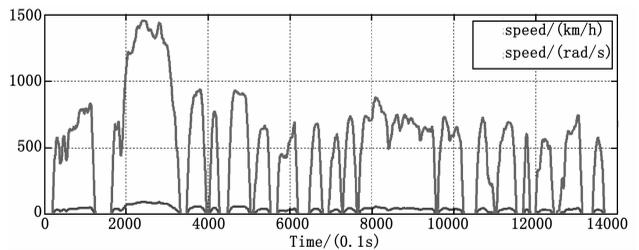


图 6 UDDS 工况下负载转速和车速

速和负载转矩, 当车速增加或者减小时, 由于模型中存在惯性模型, 使转矩也跟着升高或者降低; 当车速匀速运动时, 转矩值基本维持不变; 当停车时, 转矩的需求也为零。通过这些分析, 可以进一步知道模型具有很好的动态响应, 能够很好的跟随工况改变; 也说明了负载模型具有很好的稳定性, 不会因为工况的复杂多变而出现转矩的失真。

图 6 可以看出, 负载转速与车速的跟踪性也很好。随着工况的运行, 转速能够很好的跟踪车速, 并没有出现大的波动, 从而再一次的验证了模型的正确性, 同时也说明模型的稳定性

很好，能够在较宽的频率范围和复杂的工况下稳定的工作。

### 4 试验平台搭建

该试验平台主要由驱动电机系统、负载电机系统、扭矩仪、数据采集系统、上位机、底座等组成。根据试验台组成和硬件接口，建立整个试验系统的硬件拓扑结构，如图 7 所示。

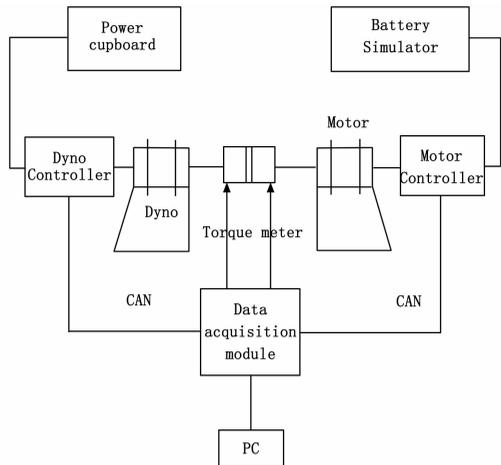


图 7 硬件接口拓扑结构

负载模拟试验的目的就是通过搭建试验台架，使台架中的驱动电机和负载电机按照某种工况运行，负载电机为驱动电机提供一种负载转矩，从而可以检测驱动电机在该工况负载下的运行特性，进一步对驱动电机特性进行析，优化驱动电机性能。

根据实验室的条件，驱动单元选用在电动公交车辆上已经使用的 YTK150/3.6 交流电机，负载单元选用 AVL 的测功机系统<sup>[12]</sup>。具体的性能参数分别如表 2、表 3 所示。

表 2 驱动电机性能参数

电机类型	电机型号	额定功率	额定转速	最大转速
交流异步	YTK140.6	100 kW	1 880 r/min	8 000 r/min

表 3 负载电机性能参数

类型	型号	额定功率	最大转速	负载转矩
交流异步电机	AFA-T 150/3.6-15	150 kW	15 000 r/min	400 N·m

驱动单元和负载单元的基本功能是在各自控制系统的作用下，实现对电机转速、转矩的控制，并使台架运行在一定的工况下，如恒转速运行、恒转矩运行等，同时实时地对电机的运行性能进行检测。基本思想是：通过建立的工况，产生车速信号，并传入到整车的负载模型中，计算得到电机输出轴上的负载转矩、转速，把转速和转矩发送到试验台中，控制驱动电机和负载电机工作在该转速和转矩下，实现实际车辆运行中电机输出端负载的等效模拟。其中，电源柜给交流测功机供电，电池模拟器的直流电通过驱动电机控制器给驱动电机供电。试验过程中的数据传输网络如图 8 所示。

本试验首先在上位机上进行负载模型的计算，通过控制程序把数据发送到试验台 CAN 网络上，借助测功机的控制软件为通讯的桥梁，在其自动循环模式下，把转矩和转速信号设置在同一个数据帧的不同字节上，实现图 8 中数据的传输。再把

扭矩仪的转速和转矩通过采集仪采集到上位机的控制系统中，实现数据的实时显示和图形的绘制，从而完成该实验。

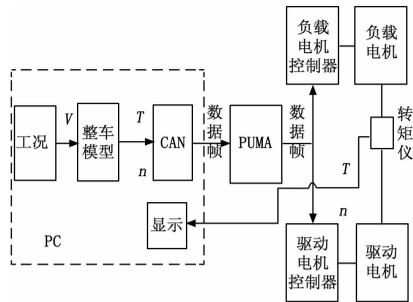


图 8 数据传输网络

### 5 试验结果分析

#### 5.1 工况分析

本试验选用城市循环工况作为整车模型的数据输入，经过模型的计算和数据的传输，完成实验，从而得到试验台上的转矩和转速曲线如图 9 所示。

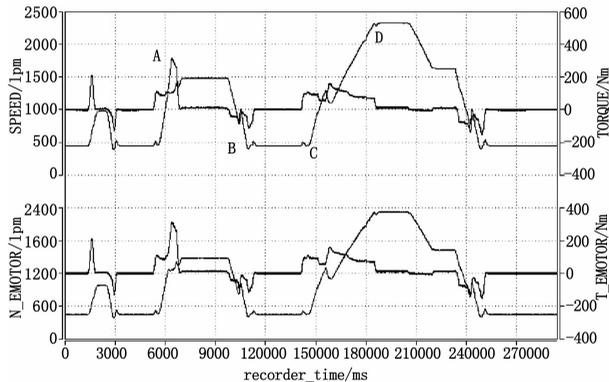


图 9 台架上转速和转矩变化曲线

图 9 中，上面一组曲线表示测功机的转矩、转速，下面的一组曲线表示驱动电机输出的转矩、转速。分析可知：

1) 转速的变化曲线中，当车辆的加速度突变的时候，转速有波动，同时转矩也出现了相应的波动；而加速度从零突变到某一个值时，转矩相应出现急剧增加。这些波动和急剧变化是与实际车辆的突然加速和突然刹车会有冲击是一致的。

2) 对比转速和转矩，当车辆加速运动时，由于惯性力的存在使负载力矩增大；当车辆停车或者匀速运动时，加速度为零，相应的惯性力也为零，这时转矩维持某一个值不变。

3) 在换挡时，转速出现了先下降后升高的波动，相应的车速也出现了波动（如图 5 所示）；而转矩在换挡点也出现了波动，波动主要包括变速器变速比的变化和惯量的改变。例如升档点 A 处扭矩从 100Nm 升高到了 160Nm 左右，之后又降到了换挡后所需要的力矩点上。B 点的降档与 A 点一样。

4) C 点运行到 D 点的过程中，加速度的变化为  $0.69 \text{ m/s}^2 - 0.61 \text{ m/s}^2 - 0.46 \text{ m/s}^2 - 0 \text{ m/s}^2$ ，所以在相应的转矩变化曲线中也呈现阶梯的下降。

通过以上分析，一方面实现了试验台的负载模拟功能，满足了转速和转矩对工况的需求，实现了转速和转矩的动态跟

踪; 另一方面验证了模型的正确性, 实现了负载转矩动态改变及对工况的跟随。

### 5.2 对比分析

#### 1) 转速对比分析。

如图 10 中的 (a)、(b) 分别为仿真转速和试验转速。

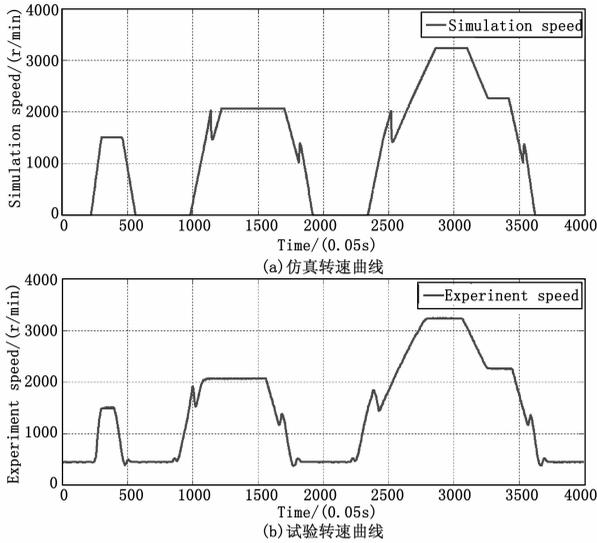


图 10 转速对比

分析图 10 可以: 试验台采集的转速与软件仿真的转速, 在整体的变化趋势和数值大小是一样的; 但是试验转速相对于仿真转速有一定的延迟, 这是由于在速度升高时, 试验台本身惯量使转速的升高有一定的延迟。

#### 2) 转矩加载分析。

图 11 中的 (a)、(b) 分别表示负载转矩的仿真转矩值和负载转矩实验结果值。

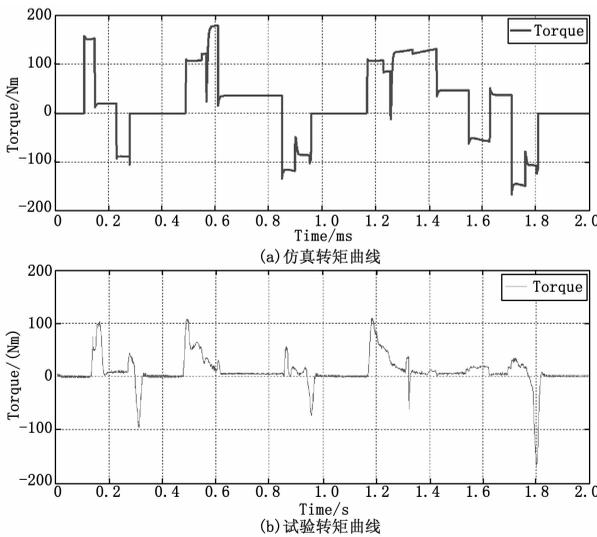


图 11 转矩对比

分析图 11 中的 (a) 和 (b) 可以知道, 可以通过试验台实现对负载进行模拟, 由于试验台的驱动转矩是开环控制, 因此只能定性的分析转矩的加载情况。比较两个图形发现, 扭矩的加载与仿真结果的变化趋势一样, 而控制精度由于试验台的

原因无法实现精确的比较。

#### 3) 速度误差分析。

图 12 是试验台仿真车速与实验车速的对比图。从图中可以知道: 仿真车速与台架试验车速基本一致, 而试验车速滞后于仿真车速。

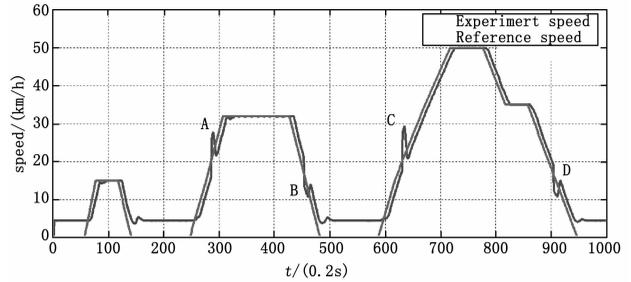


图 12 车速对比

从图 12 可知, 在 ECE15 工况下, 试验车速与工况车速的变化一致, 大小也基本一样。但是在时间轴上可以看到试验车速滞后工况车速, 存在一定的误差, 主要表现在加速或者减速的时刻。这验证了模拟车辆由于惯性的存在, 使车辆不会突然加速、减速, 需要有一定的加速、减速时间, 因此表现为车速对工况车速的延迟。而图中的 A、B、C、D 四点是由于换挡对产生的车速冲击, 说明了车辆在运行时, 换挡也会有冲击。这进一步验证了台架模拟与实际车辆运行的一致性。

从图 12 中还可看出, 模拟车辆的车速与工况车速相比, 其延迟的时间基本上是一致的, 两个车速的差值也是基本不变的, 说明这一部分的误差是由延迟的系统误差造成的。从而确认了该试验系统能够很好的模拟负载工况, 确保了负载模拟的准确性, 也验证了该系统能够在 ECE15 工况下实现对车辆负载的模拟。

## 6 总结

文中以车辆动力传递过程为基础, 建立电动车辆整车直驱逆向负载模型, 并在城市循环 ECE15 工况下开展了模型的仿真分析; 同时结合模型仿真与台架模拟, 把负载模型的仿真数据应用到“交流电力测功机—永磁同步电机”的试验平台中, 进一步进行负载模拟试验验证。通过对比分析仿真数据与试验数据得到:

1) 所建立的负载模拟系统满足车辆直驱负载的模拟功能, 实现了转速、转矩对工况需求的动态跟踪; 也验证了负载模型的正确性及对工况的跟随。

2) 试验台采集的转速与软件仿真的转速, 在整体的变化趋势和数值大小上是一致的; 而扭矩的加载与仿真结果的变化趋势相一致; 同时, 可以看到仿真车速与台架试验车速也基本一致。这充分说明了本试验模拟系统实现了对车辆直驱负载的模拟。

3) 该模拟方法可以实现电动车辆动力传动系统的性能测试, 也为电动车辆动力—负载的匹配提供了方法。

### 参考文献:

[1] 王庆利. 电动汽车电机及驱动系统测试平台的设计和应用软件的开发 [D]. 天津: 天津大学, 2004.