

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.05.015

# 基于等效转动惯量的电动汽车测试平台

江元元, 龙永红, 易吉良, 姜建伟, 张 宝

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对现有电动汽车电驱动系统测试平台采用机械飞轮惯量模拟汽车行驶惯量, 存在体积大, 不能连续调节等问题, 设计一种能对电动汽车电驱动系统进行动态加载的测试平台。采用交流电力测功机系统, 用电模拟惯量, 实现道路负载模拟和车辆的惯性载荷模拟, 并能将能量回馈至电网, 减少能量损耗; 并且优化了直流母线滤波电容和滤波电感参数的估算方法。仿真结果表明, 该试验平台能较精确地进行动态加载模拟车辆的实际行驶工况。

**关键词:** 惯量模拟; 交流电力测功机; 直流母线电容

**中图分类号:** U467.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2013)05-0067-05

## Electric Vehicle Test Platform Based on the Equivalent Moment of Inertia

Jiang Yuanyuan, Long Yonghong, Yi Jiliang, Jiang Jianwei, Zhang Bao

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** As the existing electric vehicle driving test bench adopts the mechanical flywheel inertia to simulate vehicle inertia, some problems exist in the current system, for example, large size, discontinuous regulation etc. Designs a kind of test bench which can dynamic load to EV driving system. By means of the AC electrical dynamometer system and electrical inertia simulation technology, achieves road loading simulation and vehicle inertial load simulation, returns the energy to the grid and reduce energy loss, and optimizes the estimation methods of the DC bus filter capacitance and filter inductance parameters. The simulation results show that the test bench can be more accurate on dynamic loading and simulate the actual vehicle driving conditions.

**Keywords:** inertia simulation; AC electrical dynamometer; direct current bus capacitor

## 0 引言

随着能源危机的日益加剧和环境压力的增加, 电动汽车的开发已成为了各国研究的热点。台架测试平台是研究开发汽车新技术必不可少的工具, 该平台能在较短的时间内测试汽车的各项性能指标。

在各种汽车台架测试系统中, 一个共同的技术环节是汽车机械惯量的模拟。因为汽车测试一般是在室内测试台架上进行, 汽车处于静止状态, 只有通过惯量模拟才能真实再现汽车的运动过程, 获得准确的测试数据<sup>[1-2]</sup>。

汽车的惯量通常采用机械飞轮进行模拟, 机械

**收稿日期:** 2013-08-02

**基金项目:** 湖南省科技计划基金重点资助项目(2012XK4018), 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目(12JJ9042), 湖南工业大学研究生科研创新基金资助项目(CX1302)

**作者简介:** 江元元(1987-), 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电动汽车测试平台,

E-mail: 2060208101@163.com

飞轮模拟的缺点是：飞轮质量、体积大，加工困难，而且模拟不同类型车辆的负载时，系统惯量调整困难，尤其是不能做到惯量无级调整，造成试验误差<sup>[3]</sup>。文献[4]采用飞轮惯量，详细研究了测试平台的惯量匹配方法和飞轮惯量的计算公式，并指出电惯量在未来将被研究和应用。文献[5]采用电惯量代替传统的机械惯量，模拟汽车运动惯量，相比车辆实际惯量，测试平台惯量明显偏小，因此必须利用转矩补偿进行正惯量模拟。

本文采用交流电力测功机系统作为加载装置，进行更精确的正惯量模拟和道路负载模拟，使台架试验更接近实际道路行驶工况。

## 1 测试平台设计

电驱动系统是指电动汽车用的电机及其控制器。目前，电动汽车用电机主要有3种：感应电机、永磁同步电机、开关磁阻电机。为研究高性能的电驱动系统，测试平台必须能满足动力系统全部功率范围内的精确加载和测试需要。在缺省动力蓄电池的情况下，需要配备电源模拟系统为被测电机控制器提供直流电。随着科学技术的发展和实际的需求，测试系统的自动化已成为发展趋势。因此，构建高度自动化的电动汽车电驱动系统测试平台，不仅需要高性能的加载装置模拟负载和电源模拟系统为电驱动系统提供直流电，还需设计控制与数据采集系统等，从而将合适的理论、软件、设备及联合使用的技术融合在一起，以实现测试系统的自动化。

传统电动汽车测试平台的加载装置，采用电涡流测功机、水力测功机或直流电机，测试时产生的能量以热损失的方式消耗，造成了能量浪费。

图1为采用直流电机作为加载装置的能量消耗型试验台。图中，直流电机将测试时产生的电能全部消耗在电阻上。作为电源模拟系统的整流器，将网侧三相交流电整流成直流电，通常采用二极管整流或晶闸管相控整流，容易产生谐波电流，造成对电网的污染。

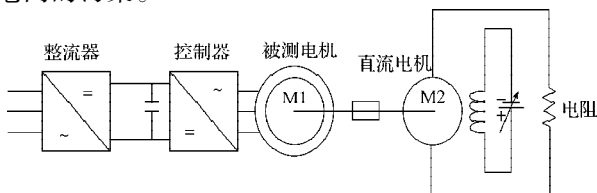


图1 能量消耗型试验台

Fig. 1 Energy consumption test bench

本文的测试平台采用交流电力测功机系统，对测试平台进行动态加载，其速度响应快、误差小，能

满足测试平台动态响应需求。交流测功机系统由测功机和变频电源组成。变频电源能四象限运行，即可控制测功机运行在电动状态（被测电机回馈制动状态）或发电状态（被测电机电动运行状态），同时可将发电状态时的电能回馈至电网，大大减少了能量损失。电源模拟系统采用三相脉冲宽度调制（pulse width modulation, PWM）整流器，该整流器能四象限运行，且控制功率因数近似为1，从而可将回馈制动试验中的能量回馈至电网，有效降低了高次谐波含量，改善了对电网的影响。电驱动系统测试平台结构框图如图2所示。

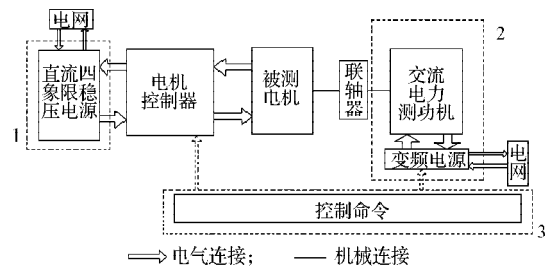


图2 电驱动系统测试平台结构框图

Fig. 2 The structure frame of electric drive system test bench

### 1.1 动态模拟

为了在测试平台上模拟车辆的行为，必须了解车辆和测试平台的相关物理参数和车辆运动时的行驶阻力。在试验台中，将行驶阻力分为道路负载阻力（滚动阻力、空气阻力、坡度阻力）和车辆惯性阻力（加速阻力）。由于测试平台惯量明显小于车辆实际惯量，试验台采用交流电力测功机进行电惯量模拟代替飞轮惯量，即利用转矩补偿进行正惯量模拟。

#### 1.1.1 车辆和测试平台动态方程

基于运动学第二定律和车辆运动方程来考虑车辆所受的行驶阻力

$$F_t = F_r + ma,$$

式中： $F_t$ 为总驱动力； $F_r$ 为道路负载阻力； $m$ 为车辆质量； $a$ 为车辆加速度。

车辆在行驶中所受总阻力可分为两部分，道路负载阻力和加速阻力。道路负载阻力

$$F_r = F_o + F_w + F_g = m \cdot g \cdot k_1 \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho \cdot k_2 \cdot A \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha,$$

式中： $F_o$ 为滚动阻力； $F_w$ 为空气阻力； $F_g$ 为坡度阻力； $g$ 为重力加速度； $k_1$ 为滚动阻力系数； $\alpha$ 为坡度角； $\rho$ 为空气密度； $k_2$ 为空气阻力系数； $A$ 为汽车迎风面积； $v$ 为车速。

加速阻力是汽车加速行驶时，克服其质量加速运动时的惯性力。车辆电驱动系统的暂态性能主要

由这一部分阻力加载时体现。文献[6]中详细讨论了车辆等效转动惯量  $J_e$ ,

$$J_e = (1 + 0.04 + 0.0025G^2)mR^2/G^2,$$

式中:  $G$  为总传动比;  $R$  为车轮半径。

车辆在实际道路行驶时的动态方程为

$$T_i - T_r = J_e \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

式中:  $T_i$  为驱动电机输出转矩;

$T_r$  为电机侧受到的道路负载阻力矩;

$\omega$  为电机角速度。

测试平台上的等效动态方程为

$$T_i - T_d = (J_c + J_i + J_d) \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

式中:  $J_c$  为联接轴的转动惯量;

$J_i$  为电机的转动惯量;

$T_d$  和  $J_d$  分别为测功机的输出转矩和转动惯量。

### 1.1.2 控制策略

开发电动汽车电驱动系统测试平台的一个重要内容, 就是控制系统的设计, 使其能在不同的行驶工况下, 实现被测电机和测功机的同时控制, 并使整个测试系统稳定运行。电动汽车上的电驱动系统采用转速模式控制电机, 而交流电力测功机采用转矩闭环控制整个平台的转矩。这种控制策略是先预设一个行驶工况(车速-时间曲线), 然后转化为电机转速信号作为电驱动系统的转速给定; 同时根据设定的行驶工况和车辆动态方程, 计算出需求的阻力矩作为测功机系统的转矩给定。

由式(1)和式(2)可计算出在测试平台上测功机需要模拟加载的阻力矩

$$T_d = (J_c - J_c - J_i - J_d) \frac{d\omega}{dt} + \frac{F_t R}{G}, \quad (3)$$

式中: 第一部分是用电惯量模拟的补偿转矩;

第二部分是加载到电机侧的道路负载阻力矩。

在城市道路循环(urban dynamometer driving schedule, UDDS)工况下, 利用某一典型车辆的整车参数, 得上述两部分阻力矩, 如图3所示。

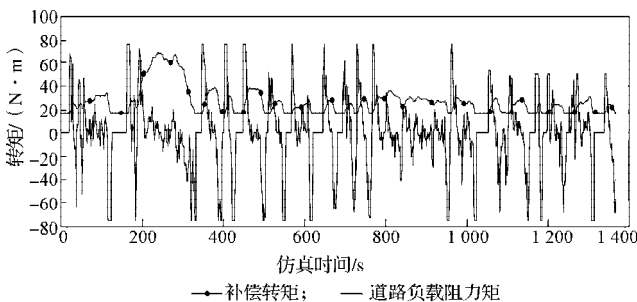


图3 UDDS工况下的补偿力矩和负载阻力矩

Fig. 3 Compensation torque and resistive torque for the UDDS cycle

测试平台采用上述控制策略, 要求电驱动系统和测功机系统都能以最小的误差和延时跟踪上给定的转速和转矩曲线, 从而使测试平台精确地模拟车辆的动态运行。这种控制策略的缺点是车速-时间曲线必须已知, 因为转矩给定是根据车速-时间曲线确定的。因而, 这种方法不能模拟行驶工况未知的电动汽车的动态运行过程。

测试平台的交流电力测功机系统, 如图2中2单元所示。经上述推导可知, 在行驶工况已知的情况下, 采用测功机加载式(3)所计算的阻力矩, 能在测试平台上模拟实际车辆运行工况, 实现动态加载。

### 1.2 电源模拟

设计了电源模拟系统, 通过三相PWM整流器将电网的交流电整流成可调的直流电, 输送给被测电机控制器。由三相PWM整流器组成的双向直流稳压电源, 既能为驱动系统提供稳定的直流电, 也能在车辆制动能量回馈试验中将能量反馈给电网。电源模拟模块如图2中1单元所示。三相PWM整流器的整个主电路以两电平结构的绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)变流器为核心, 包括IGBT模块、直流侧电容和电感等, 见图4。

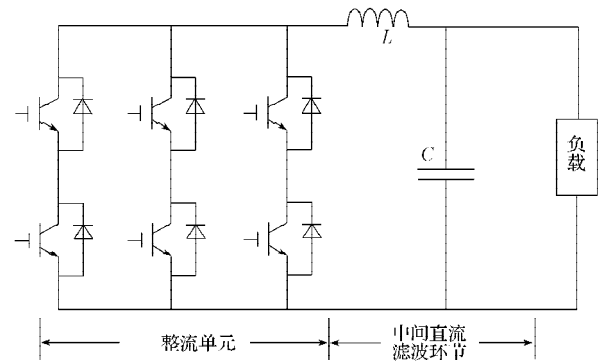


图4 三相PWM整流器主电路拓扑结构图

Fig. 4 Three-phase PWM rectifier topology

直流母线滤波电容  $C$  的大小既关系到系统的成本, 更关系到在各种扰动(负载变化或电网电压波动)下直流母线电压的稳定性和动态响应速度, 进而关系到整个系统的抗干扰性和PWM整流器的品质, 因此电容值的准确计算十分重要。在直流侧串联滤波电感  $L$ , 可以提高功率因数, 降低谐波分量。

假定系统设计功率为  $P$ , 网侧输入线电压为  $U$ , 电源频率为  $f$ , 则网侧相电流

$$I = P/U;$$

阻抗标幺值

$$Z_b = \frac{U}{\sqrt{3}I} = \frac{U^2}{\sqrt{3}P};$$

电容标么值

$$C_b = \frac{1}{2\pi f Z_b} = \frac{\sqrt{3}P}{2\pi f U^2}; \quad (4)$$

电感标么值

$$L_b = \frac{Z_b}{2\pi f} = \frac{U^2}{2\sqrt{3}\pi f P}. \quad (5)$$

在实际设计中, 往往取

$$C \geq K_c C_b, \quad (6)$$

$$L \leq K_l L_b, \quad (7)$$

式(6)~(7)中,  $K_c, K_l$ 均为经验系数, 工程中 $K_c$ 一般取20或30,  $K_l$ 取10%或15%。

以某双向直流电源为例, 输出最大电压为450 V, 输出最大电流为350 A, 网侧输入线电压为380 V, 电源频率为50 Hz。

由式(4)得 $C_b=3\ 300\ \mu\text{F}$ , 若 $K_c$ 取20并代入式(6), 得 $C \geq 66\ 000\ \mu\text{F}$ 。

由式(5)得 $L_b=2.93\ \text{mH} \approx 3\ \text{mH}$ , 若 $K_l$ 取10%并代入式(7), 得 $L \leq 0.3\ \text{mH}$ 。

实际的电驱动系统测试平台往往比较复杂, 各种物理量或控制方式都会对电容或电感的精确计算产生影响。一般先根据实际经验估计大小, 再搭建整个系统精确的仿真模型, 用估计值作为初值进行仿真, 再适当调节参数大小, 以满足实际技术方案中对电压波动、响应时间、纹波电流的要求, 并考虑成本、体积大小来选择最佳参数值。

通过上述计算, 优化了电压型变频器中间直流环节滤波电容和滤波电感参数的估算方法, 若要得到最佳参数值, 还需进一步研究。

## 2 仿真实验

用Matlab/Simulink搭建仿真测试平台, 验证测试平台技术方案的可行性和有效性。采用城市道路循环作为行驶工况, 并根据式(3)计算出测功机需要模拟的总阻力矩, 模拟实际车辆运行工况, 测试电驱动系统的性能, 同时验证整个测试平台控制策略的可行性。仿真试验结果如图5~7所示。

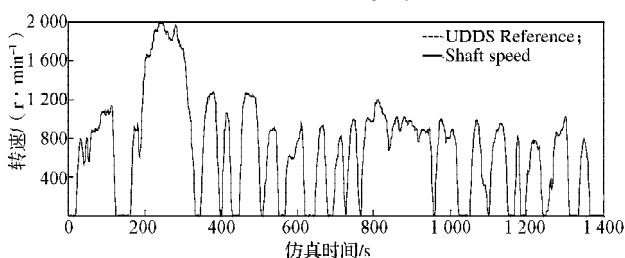


图5 UDDS工况下参考转速和电机转速

Fig. 5 Reference speed and motor speed for the UDDS cycle

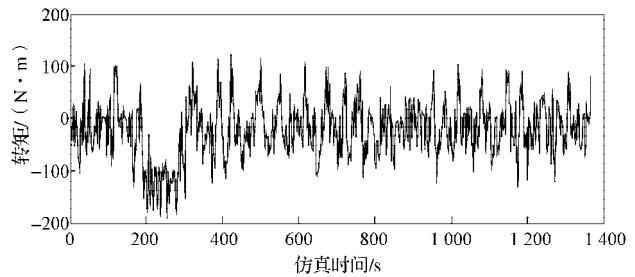


图6 UDDS工况下测功机输出转矩

Fig. 6 The of dynamometer output torque for the UDDS cycle

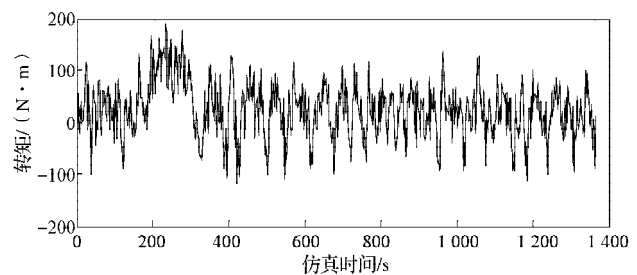


图7 UDDS工况下电机轴输出转矩

Fig. 7 The motor shaft output torque for the UDDS cycle

由图5可以看出, 车辆以最小的误差跟踪上了UDDS工况。由图6和图7可知, 测功机模拟产生的总阻力矩与被测电机的电磁转矩方向相反, 幅值相差不大。由此可知, 交流电力测功机系统实现了动态加载, 被测电机既电动运行又制动运行, 整个仿真测试平台稳定, 验证了测试平台控制策略的有效性。图6中, 转矩波动较大, 表明在实际测试平台中采用的测功机系统, 需要更高的转矩响应速度, 而且误差要小, 从而实现精确稳定加载。在UDDS工况下, 若被测电驱动系统不能以最小误差跟踪上循环工况, 则表明其性能不能满足电动汽车的需求, 那么电机或电机的控制系统需进一步改进和完善。

## 3 结语

本文研究了电动汽车电驱动系统测试平台的动态加载问题, 采用测功机系统实现道路负载模拟和车辆的惯性载荷模拟。建立了仿真测试平台, 验证了测试平台技术方案的可行性和控制策略的有效性。关于电压型变频器中间直流环节滤波电容和滤波电感参数的估算算法, 在实际应用中可行, 并且可靠。

参考文献:

- [1] 莫志勇, 张为公, 吉同舟. 汽车机械惯量电模拟技术[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(1): 123-126.

Mo Zhiyong, Zhang Weigong, Ji Tongzhou. Electrical Simulation of Vehicle Mechanical Inertia[J]. Journal of

- Chinese Inertial Technology, 2009, 17(1): 123-126.
- [2] 张为公, 周宁宁. 汽车台架试验系统机械惯量电模拟方法[J]. 汽车工程, 1998, 20(5): 312-316.  
Zhang Weigong, Zhou Ningning. The Electric Simulation for Mechanical Inertia in Vehicle Bedstead Test System[J]. Automotive Engineering, 1998, 20(5): 312-316.
- [3] 朱晓锦, 张为公, 金伟民, 等. 汽车同步器试验系统机械惯量电模拟研究与实现[J]. 汽车工程, 2001, 23(2): 134-138.  
Zhu Xiaojin, Zhang Weigong, Jin Weimin, et al. Research and Realization of Electric Simulation for Mechanical Inertia in Vehicles Synchronizer Testing System[J]. Automotive Engineering, 2001, 23(2): 134-138.
- [4] Song Qiang, Sun Fengchun, Zhang Muqiao, et al. Inertia Matching During Dynamic Simulation of Vehicle Drive System on Test Bench[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: English Edition, 2004, 13(2): 197-201.
- [5] 莫志勇, 张为公, 吉同舟, 等. 基于直接转矩控制的先进汽车测试系统[J]. 电气传动, 2009, 39(11): 7-10.  
Mo Zhiyong, Zhang Weigong, Ji Tongzhou, et al. Advanced Vehicle Testing System Based on Direct Torque Control[J]. Electric Drive, 2009, 39(11): 7-10.
- [6] Fajri P, Ahmadi R, Ferdowsi M. Equivalent Vehicle Rotational Inertia Used for Electric Vehicle Test Bench Dynamic Studies[C]//Proceedings of the 38th IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference. Montreal: IEEE Press, 2012: 4115-4120.

(责任编辑: 邓光辉)

(上接第57页)

- [10] 乐江源, 张 志, 赖小华. 三相并联型有源电力滤波器预测直接功率控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(5): 86-90.  
Le Jiangyuan, Zhang Zhi, Lai Xiaohua. Predictive Direct Power Control of Three-Phase Shunt Active Power Filter [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(5): 86-90.
- [11] 赵方平, 杨 勇, 阮 毅, 等. 三相并网逆变器直接功率控制和直接功率预测控制的对比[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 212-220.  
Zhao Fangping, Yang Yong, Ruan Yi, et al. Comparative Study for Direct Power Control and Direct Power Predictive Control in Three-Phase Grid-Connected Inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 212-220.
- [12] 王广柱. 有源电力滤波器谐波及无功电流检测的不必要性(一)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 137-141.  
Wang Guangzhu. The Unnecessaries of Harmonic and Reactive Current Detection for Active Power Filters (Part I) [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 137-141.
- [13] 王广柱. 有源电力滤波器谐波及无功电流检测的不必要性(二)——仿真及实验[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 132-136.  
Wang Guangzhu. An Investigation on the Unnecessaries of Harmonic and Reactive Current Detection for Active Power Filters (Part II): Simulation and Experiment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 132-136.
- [14] 李志勇, 沈玲菲, 徐保友, 等. 基于无谐波检测的LCL-APF直接功率控制[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 217-221.  
Li Zhiyong, Shen Lingfei, Xu Baoyou, et al. An LCL-APF Direct Power Control Approach Based on Non-Harmonic Detection Technology[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 217-221.

(责任编辑: 邓光辉)