

# 室内台架测试平台的电动汽车测试系统

吴海龙,孙晓明,卢晨

(武汉理工大学 自动化学院,湖北 武汉 430070)

**摘要:**传统测功机台架响应能力和快速切换能力差,缺乏针对性测试方法,难以直接应用于新型电动汽车动力系统测试。因此,基于交流电力测功机的室内台架 Labview 测试平台,设计了电动汽车测试系统。首先,分析了测试平台的负载模拟原理和基于九点控制的动态切换比例积分微分(PID)控制策略,构建了测试系统硬件平台;然后,利用高级车辆仿真器(ADVISOR)建模仿真,得出工况测试数据;最后,在台架测试平台上进行动力系统测试,完成电动汽车运行时的工况测试。测试结果表明:电力测功机实现了电机两象限快速、稳定的切换,台架系统模拟了电动汽车运行工况,完成了动力系统的性能测试。

**关键词:**测试系统;电力测功机;动态切换 PID 控制;工况测试

**中图分类号:**TP273+.5

**文献标志码:**A

## 0 引言

动力系统测试是电动汽车研究的核心,测试方法主要有计算机仿真测试、室内台架测试和道路行驶测试<sup>[1]</sup>。室内台架测试不受道路条件约束和环境影响,控制灵活,能在线检测整车动力系统性能以及各零部件状态信息。

国外对台架测试平台早有研究,如文献[2]进行了早期测试台架试验用于内燃机的研发和测试,文献[3]开发了混合动力系统测试台架,针对性解决了混合动力系统动力总成等问题。目前,国内测试台架的研究集中于控制策略上。文献[4]设计了基于向后传播(back propagation, BP)算法模糊神经网络的比例积分(proportion integration, PI)控制器,控制驱动电机以达到车速的精确跟随。文献[5]从电动汽车能量传递方面研究了系统控制。但文献[4-5]在驱动电机性能测试上,采用整车机械惯量模拟台架进行试验,而机械惯量大小难以控制,测试台架存在局限性。在此基础上,文献[6]提出了基于驾驶员与电驱动系统双在环动态模拟实验台。文献[7]采用模糊比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)控制策略,文献[8]采用九点控制策略,实现了台架测试系统中电力测功机的控制,在这两种控制策略下,台架系统有较高的准确性和稳定性,但缺少电动汽车动力系统工况动态测试试验。文献[9]基于虚拟仪器设计了电动汽车测试系统,针对整车控制器和动力系统进行集成测试,但对于动力系统各零部件的测试还存在不足,如驱动电机的带载能力、工作效率、控制优化等难以具体测试。

台架测试平台在系统结构、控制策略和功能需求上还没有统一的方案,研究基于电力测功机的台架测试系统,能够改善传统测功机台架响应能力和切换能力差的缺点。因此,本文分析了测试平台的负载模拟原理,设计了基于九点控制的动态切换 PID 控制策略,构建测试系统硬件平台,利用高级车辆仿真器(advanced vehicle simulator, ADVISOR)建模仿真,得出工况测试数据,在台架测试平台上完成电动汽车行驶工况下的动态测试。

## 1 台架系统负载模拟与控制策略分析

室内台架测试平台可完成电动汽车驱动系统、整车性能和能量管理等测试。台架系统电力测功机

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51477125)

**作者简介:**吴海龙(1991-),男,江苏无锡人,硕士生;孙晓明(1958-),男,山东龙口人,副教授,硕士生导师,研究方向为过程控制系统。

**收稿日期:**2017-03-03

可实现道路行驶负载模拟。车辆在道路上的行驶方程<sup>[10]</sup>为:

$$F_i = \sum F = F_f + F_w + F_i + F_j, \quad (1)$$

其中:  $F_i$  为驱动力, N;  $\sum F$  为各行驶阻力之和, N;  $F_f$  为滚动阻力, N;  $F_w$  为空气阻力, N;  $F_i$  为爬坡阻力, N;  $F_j$  为加速阻力, N。

电动汽车动态运动方程<sup>[10]</sup>为:

$$T_{iq} = r(0.5\rho C_D A u_r^2 + Mgf_f \cos \alpha + Mgsin \alpha + \delta Mdu/dt)/(i \cdot \eta_T), \quad (2)$$

其中:  $T_{iq}$  为发动机转矩, N·m;  $i$  为变速器传动比;  $r$  为车轮半径, m;  $\eta_T$  为传动系机械效率;  $M$  为整车质量, kg;  $g$  为重力加速度,  $m \cdot s^{-2}$ ;  $f_f$  为滚动阻力因数;  $\alpha$  为地面坡度角, rad;  $C_D$  为空气阻力因数;  $A$  为迎风面积,  $m^2$ ;  $u_r$  为相对速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\rho$  为空气密度,  $N \cdot s^2 \cdot m^{-4}$ , 一般取  $1.2258 N \cdot s^2 \cdot m^{-4}$ ;  $du/dt$  为行驶加速度,  $m \cdot s^{-2}$ ;  $\delta$  为汽车旋转质量换算因数,  $\delta > 1$ 。

电动汽车在台架系统上进行动力系统测试, 电力测功机作为驱动电机的负载, 模拟汽车行驶时的负载扭矩。驱动电机加速时还需承受车辆惯性带来的附加扭矩, 而这部分扭矩可利用电力测功机电量模拟实现。

台架系统电力测功机模拟道路负载, 主要控制参数为交流电机的转速和扭矩。采用九点控制与 PID 控制动态切换的控制策略控制电力测功机, 检测电机各参数, 将信号反馈给控制器, 形成闭环系统, 完成测试台架的控制。

九点控制与 PID 控制动态切换的控制策略主要基于模糊 PID 控制思想, 能够简化控制规则, 提高控制效果。主要控制思路为: 当控制对象偏离设定值时, 控制器自动加上一个反作用力, 迫使系统响应回归到设定值附近<sup>[11]</sup>。设定  $\pm e_0$  为系统允许偏差; 定义  $r(t)$  为系统输入量;  $y(t)$  为系统输出量;  $e$  为系统偏差,  $e = r(t) - y(t)$ ;  $\dot{e}$  为偏差变化率,  $\dot{e} = \text{本次偏差} - \text{上次偏差}$ 。由偏差和偏差变化率的变化情况可形成 9 种工况, 从而得到相应 9 种控制策略。九点控制器工况分布及控制规则如表 1 所示。

九点控制器分别调节 9 个区域的控制策略, 为非线性控制器, 然而对于每个区域来说, 则是线性控制器。针对每一个线性区域, 利用性能较优的 PID 控制调节。根据不同的工况, 得到 9 种控制规则, 在整个系统控制作用中动态切换控制策略, 从而形成基于九点控制的动态切换 PID 控制器。以单位阶跃响应曲线来分析每个线性区域下的 PID 控制, 如图 1 所示。

从图 1 中可以看出: 对于工况 1 和工况 2, 系统处于阶跃响应初期, 响应曲线快速上升, 对应延迟时间和上升时间, 要求系统响应快, 故只需比例 (proportion, P) 控制, 控制作用分别为  $P_{3+}$  和  $P_{2+}$ 。工况 3 为偏差零带内, 应保持在设定值附近, 此时曲线对应第 1 次穿越偏差带, 偏离稳态较快, 且斜率大, 振荡频率快, 故采用 PID 控制, 控制作用为  $P_{1+}I_+D_-$ , 积分时间上调, 微分时间下调。工况 4 影响系统超调, 此时无需加积分作用, 可弱加微分作用, 为比例微分 (proportion differentiation, PD) 控制, 控制作用为  $P_{4+}D_+$ 。工况 5 影响系统的最大超调量, 为降低超调只需加 P 控制, 控制作用为  $P_{3-}$ 。工况 6 的主要作用是改变系统从最大超调下降至稳态的速度, 此时应使系统更快进入稳态, 故应多加微分作用, 加快动态性能, 采用 PD 控制, 控制作用为  $P_{2-}D_+$ 。工况 7 和工况 3 类似, 系统响应在偏差带内, 应进行 PID 控制, 控制作用为  $P_{1+}I_-D_+$ , 此时曲线偏离稳态较慢, 振荡较慢, 为加快动态性能, 应少加积分, 多加微分。工况 8 为穿过零带, 影响系统负超调, 变化缓慢, 可用 PD 控制, 控制作用为  $P_{4+}D_+$ , 增加动态响应能力。工况 9 为响应稳定阶段, 影响最终输出, 影响调节

表 1 九点控制器工况分布及控制规则

偏差	偏差变化率		
	$\dot{e} \geq \dot{e}_0$	$ \dot{e}  < \dot{e}_0$	$\dot{e} \leq -\dot{e}_0$
$e \geq e_0$	工况 8: $K_{4+}$	工况 1: $K_{3+}$	工况 2: $K_{2+}$
$ e  < e_0$	工况 7: $K_{1+}$	工况 9: $K_0(0)$	工况 3: $K_{1-}$
$e \leq -e_0$	工况 6: $K_{2-}$	工况 5: $K_{3-}$	工况 4: $K_{4-}$

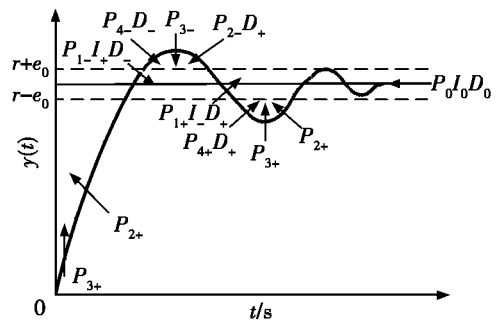


图 1 阶跃响应下各工况 PID 控制分布

时间,故应采用PID控制,控制作用为 $P_0I_0D_0$ ,积分作用消除静差,微分作用加快动态性能,减少调节时间。

将基于九点控制的动态切换PID控制器应用于台架测试平台电力测功机扭矩控制闭环系统中,其扭矩控制框图如图2所示。扭矩由主控制器给定,由驱动器变频控制异步电机。扭矩传感器测量扭矩并将扭矩信号反馈,实现电力测功机的扭矩控制。

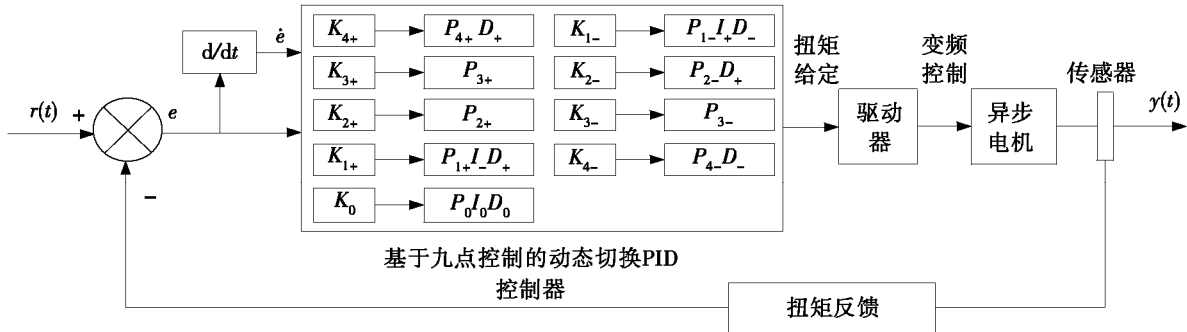


图2 基于九点控制的动态切换PID控制器扭矩控制框图

## 2 室内台架 Labview 测试平台

### 2.1 测试系统硬件结构

室内台架测试平台主要由电力测功机、牵引电机及其控制器、动力电池组及电池管理系统(battery management system, BMS)、计算机控制系统等组成。台架测试平台系统结构如图3所示。

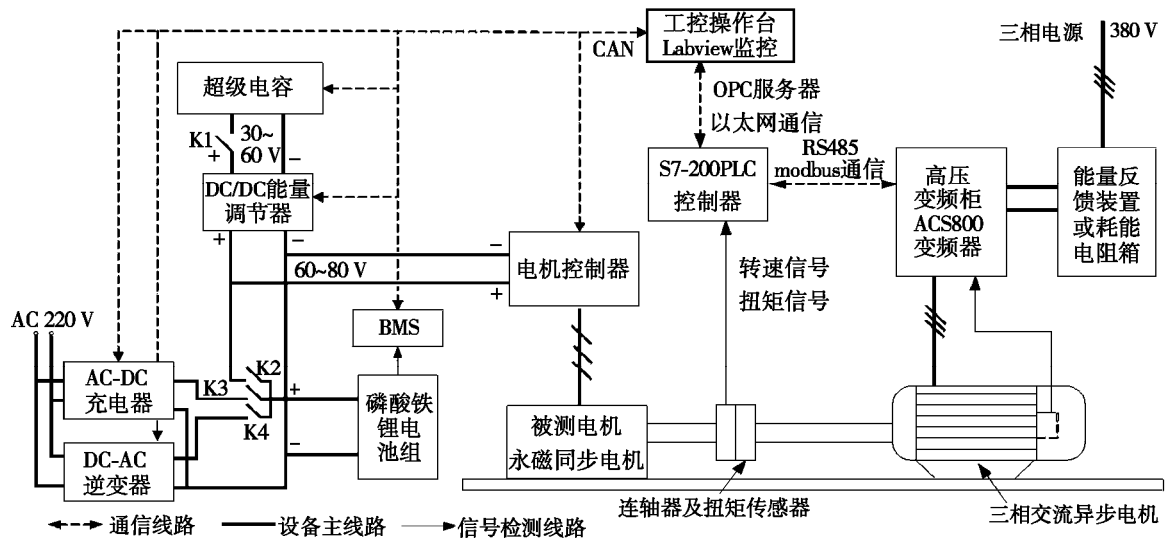


图3 台架测试平台系统结构

图3中,电力测功机包含可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、ACS800变频器、额定功率为30kW的三相交流异步电机(额定转速为2950r/min,额定扭矩为95N·m)。PLC与ACS800变频器之间采用modbus通信,控制异步电机工作。被测电机采用永磁同步电机,用连接轴及扭矩传感器和三相交流异步电机相连,由电机控制器实现电机的控制。动力模块主要是额定容量100Ah的磷酸铁锂电池作为动力电池组,由BMS监控电池性能。测试台架系统配备车载交流-直流变换(alternating current-direct current, AC-DC)充电器,超级电容器模组可满足混合动力电动汽车的测试,由直流-直流变换器(direct current-direct current, DC-DC)来调节超级电容与锂电池之间的能量平衡。计算机控制系统通过控制器局域网(controller area network, CAN)与DC-DC、电机控制器、BMS通信,利用用于过程控制的对象连接和嵌入技术(object linking and embedding for process control, OPC)服务器与PLC通信,将数据采集到计算机进行存储与分析,实现台架测试平台的监控。

### 2.2 测试系统软件设计

测试平台主要有能量管理系统、电机控制系统、锂电池系统和测功机系统 4 个部分,由上位机采用图形化编程软件 Labview 开发设计监控界面,完成系统控制运行、信息采集、数据处理和波形显示等功能。

电动汽车测试流程如图 4 所示。利用台架测试平台进行电动汽车道路工况试验,首先由电动汽车类型配置试验车型参数,选择试验道路工况,确定工况下的负载扭矩。台架工况试验之前,计算好电机转速和扭矩数据,以此同步给牵引电机和测功电机转速、扭矩指令。然后运行台架系统,测试数据,将数据存储、分析、处理,得出测试结果。

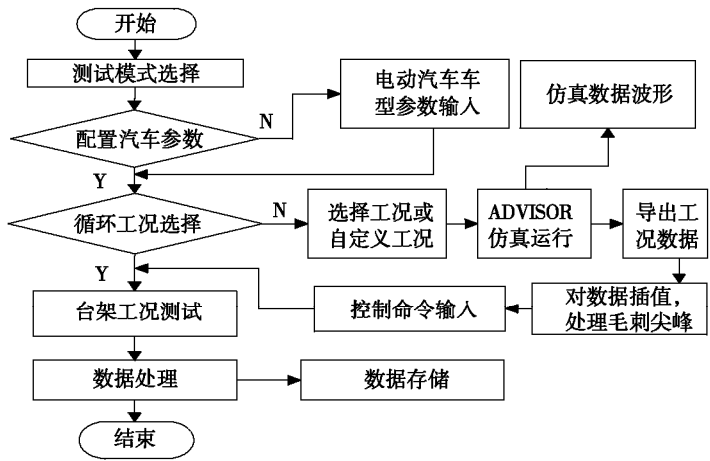


图 4 电动汽车测试流程图

### 3 道路工况仿真模拟

道路工况仿真模拟测试依赖于准确的模型和计算机软件,如 MATLAB/Simulink 软件和 ADVISOR 软件等。ADVISOR 软件利用模块化思想对汽车发动机、变速器、主减速器、车轴和车轮等建立仿真模块,对汽车各项性能进行测试分析<sup>[12]</sup>。

使用 ADVISOR 软件进行道路工况循环试验,根据需要测试的电动汽车配置参数。选择小型纯电动电动汽车作为试验对象,参数如表 2 所示。

表 2 小型纯电动电动汽车参数

整车满载质量 $M/\text{kg}$	迎风面积 $A/\text{m}^2$	空气阻力 因数 $C_D$	滚动阻力 因数 $f_f$	传动系 统效率 $\eta$	车轮半径 $r/\text{m}$	减速器 传动比 $i_1$	变速器 传动比 $i_2$	最大驱动, 制动转矩 $T_{m1}, T_{m2}/(\text{N} \cdot \text{m})$	最大转速 $n /$ ( $\text{r}/\text{min}$ )
424	1.51	0.3	0.009	0.95	0.282	4: 1	1: 1	40, 30	2 800

为模拟电动汽车的道路行驶工况,测试电动汽车各部件的动态参数,尤其是测试动力电池和驱动电机的性能,结合驱动电机的参数,选择较为常用的欧洲城市道路工况 (economic commission for Europe, ECE) 来进行测试。针对电动汽车,进行相关的仿真数据参数设置,设置循环工况次数为 1,总时长 200 s,仿真时间步长为 1。考虑到电动汽车运行时系统中有能量回馈,故将初始锂电池荷电状态 (state of charge, SOC) 值设置为 0.9。

参数设置完成后进行仿真运行,从输出结果中分析驱动电机的转速、扭矩输出和锂电池 SOC。由 MATLAB 软件工作空间中导出转速、扭矩数据,并作分析处理,保存到数据库,作为台架测试平台测试电动汽车各项性能的试验数据。ECE 道路工况仿真结果如图 5 所示。

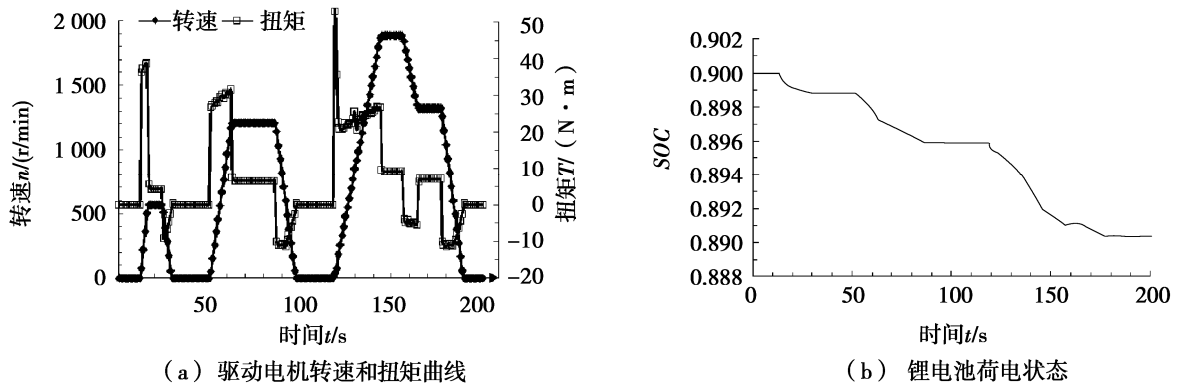


图 5 ECE 道路工况仿真结果

由图 5a 可以看出:电动汽车在 ECE 工况下经历了 3 次启动,分别在加速、匀速巡航和制动停车阶段。在每次匀加速上升时,驱动电机瞬时响应,以大扭矩输出,并基本恒定。匀速巡航阶段,电机扭矩突降,维持在  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$  左右。制动停车阶段,电机扭矩及时响应,突变为负扭矩,回馈制动,直至停车。图 5b 反映了电动汽车 ECE 工况下的耗能情况。由图 5b 可知:每次启动加速阶段,电池提供电能,且放电较快;匀速行驶时,耗能较少;制动停车阶段,电机回馈制动,给锂电池充电,电池 SOC 略有上升。仿真结果体现了电动汽车运行时驱动电机和动力电池组的工作状态,以及动力系统性能。

#### 4 电动汽车行驶工况试验

电动汽车在道路工况测试时,台架测试平台电力测功机模拟车轮负载,稳定被测电机的转速,适应扭矩变化,发电运行,必要时工作在电动模式下,反拖被测电机,模拟车辆下坡,回馈制动。测功电机与驱动电机必须同时给转速值和扭矩值,使其能够实时响应动态工况的变化。监控界面显示系统工作状态,测试电动汽车在行驶工况的运行性能。

根据电动汽车 Labview 测试平台的测试步骤,进行电动汽车 ECE 工况试验,用来测试汽车行驶过程中驱动电机输出性能和能量管理性能等。工况测试中,负载扭矩变化频繁,故采用电池 + 超级电容 (battery + capacitor, B + C) 模式引入超级电容,通过 DC-DC 调节,与锂电池协调供能。将 ADVISOR 软件仿真得出的转速、扭矩工况数据作为电动汽车工况测试数据,由上位机给电力测功机转速数据,模拟负载情况,同时给电机控制器扭矩数据,进行电动汽车动力系统动态工况测试。

试验完成后,根据测试平台实测数据,导出 ECE 工况下测得的转速和扭矩数据,绘制曲线,如图 6 所示。

由图 6 可以看出:ECE 工况下有 3 次启动,分别在匀加速、匀速巡航和停车制动阶段。0 ~ 50 s 为第 1 阶段,在 12 s 时扭矩突变为  $38 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,被测电机拖动测功机运行,电机转速匀加速上升至  $565 \text{ r/min}$ ,停止加速。被测电机运行电动状态,测功机运行发电状态。然后进入匀速巡航阶段,扭矩立刻降为  $3.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,并在 22 s 时开始停车制动,扭矩立即降到  $-10 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,尽管匀减速运行,但扭矩并不恒定,可认为转速较低时,停止了驱动电机负载扭矩的给定,直至 30 s 时停车,转速和扭矩分别降为  $0 \text{ r/min}$  和  $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。这时测功机作为制动器电动运行,被测电机发电运行。50 ~ 110 s 为第 2 阶段,重复第 1 阶段测试,在巡航阶段转速较高,为  $1207.7 \text{ r/min}$ ,但扭矩相差不多,为  $5.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。118 ~ 200 s 为第 3 阶段,比起前两个阶段,多了 1 次减速运行后匀速巡航。在 140 s 时进入第 1 次巡航阶段,扭矩从  $25 \text{ N} \cdot \text{m}$  突变为  $7.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,转速恒定为  $1888.6 \text{ r/min}$ 。在 155 s 时减速,扭矩突变为  $-8 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,然后匀速运行时,扭矩再次变为  $5.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,最后在 175 s 时减速停车制动。3 个阶段被测电机和测功机都在电动状态和发电状态下运行,根据工况的不同不断切换,动态响应能力强。

在 ECE 工况下,每个阶段转速和扭矩变化响应及时,整个试验过程模拟了实车在运行过程中实时响应负载状况。由图 6 可以看出:台架测试平台电力测功机能够快速地在电动状态和发电状态可相互切换,实现电机 I、IV 象限运行,做到电能供给与能量回馈。切换过程中基本没有扰动,稳定性好,满足电动汽车测试台架动力系统测试要求。

ECE 工况测试下分析驱动电机性能,被测电机响应及时,输出扭矩大,运行状态切换迅速。另外,从测试平台上得出被测电机母线电压  $U$  和电流  $I$ 。电机的功率和效率计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$\begin{cases} \text{输入功率: } P_i = UI; \\ \text{输出功率: } P_o = T \cdot n / 9550; \\ \text{电机效率: } \eta = P_o / P_i. \end{cases} \quad (3)$$

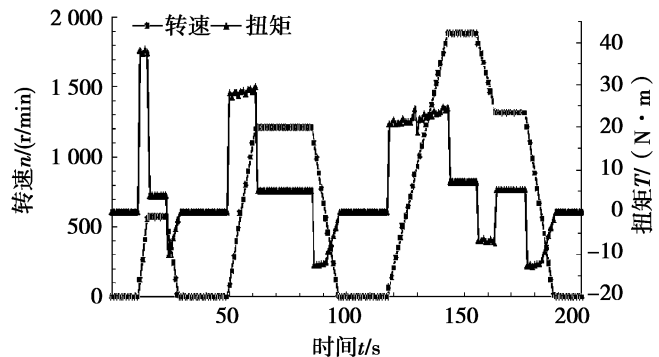


图 6 测试平台实测转速和扭矩曲线

由式(3)可以得出,被测电机在电动状态时效率能达到85%;在发电状态下,电机效率略低,能达到75%左右,且转速和负载的增加,能够提高电机运行效率。由测试数据分析可得该永磁同步电机的输出特性较好。

若只考虑锂电池SOC来简单估算续航里程,则电动汽车的续航里程计算公式<sup>[14]</sup>为:

$$\hat{L} = \frac{L}{SOC_{初} - SOC_{末}} \times SOC_{总}, \quad (4)$$

其中: $\hat{L}$ 为预估续航里程,km; $L$ 为测试里程,km; $SOC_{初}$ 为开始测试时锂电池组荷电状态; $SOC_{末}$ 为测试结束时锂电池组荷电状态; $SOC_{总}$ 为系统动力电池组总荷电状态。

由测试平台记录数据可知:锂电池的初始SOC为80.0%,测试结束时SOC为77.2%,5次ECE工况测试里程为5km。得出整车满载质量为424kg的电动汽车满容量时的续航里程大约为180km。考虑到电池寿命,电池SOC在较低时并不能大电流充分放电,但采用B+C混合动力模式,经DC-DC调节,超级电容可补偿锂电池供电不足,使实际续航里程接近估算值。

## 5 结束语

在基于九点控制的动态切换PID控制策略下,室内台架测试平台中电力测功机转速响应迅速,能够良好地模拟负载,实现电机两象限快速切换,稳定运行在电动/发电两个状态,测试精度高,性能良好,满足电动汽车动力系统测试需求。台架测试平台对电动汽车进行ECE工况测试,反映出被测电机扭矩响应快、功率输出大、效率高、输出特性好,动力电池满足大电流放电要求,汽车整车性能优良。室内台架测试平台电动汽车测试系统实现了电动汽车整车、动力系统以及各零部件性能测试。

### 参考文献:

- [1] 胡毓冬,周铨,徐刚.整车道路模拟虚拟试验台研究[J].汽车工程学报,2014,4(2):137-142.
- [2] ZHANG G R,ZHANG H H,LI H Y. The driving control of pure electric vehicle [J]. Procedia environmental sciences, 2011,10:433-438.
- [3] HE H W,SUN F C,XING J. Dynamic simulation of electric drive system on test bench[M]. Boca Raton: Taylor & Francis Press,2007:145-147.
- [4] 陈燎,丁猛,盘朝奉. BP模糊神经网络纯电动汽车电机控制[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2016,37(4):32-35,40.
- [5] 盘朝奉,张秀丽,陈燎,等. 纯电动汽车再生制动系统能耗特性[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(6):20-25.
- [6] 熊会元,韩祥,胡意,等. 驾驶员在环的电驱动系统模拟试验台研究与开发[J]. 汽车技术,2016(5):52-56.
- [7] 邱磊. 电动汽车负载测功台架的研究与设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [8] 李园园. 交流电力测功机控制系统的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2014.
- [9] 井后华,王芳,刘志远,等. 基于虚拟仪器的电动汽车控制器自动测试系统[J]. 汽车技术,2016(11):25-29.
- [10] 伍庆龙,宗志坚,刘忠途. 基于室内台架的电动汽车行驶工况仿真及测试[J]. 微特电机,2011,39(2):37-40.
- [11] 孙晓明,张靖瑶,徐群丽. 九点控制器在扰动系统中的应用[J]. 自动化技术与应用,2007,26(4):17-19.
- [12] 包建超. 基于ADVISOR仿真的纯电动汽车动力系统匹配研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [13] 陈燎,谢明维,盘朝奉. 模糊能耗及卡尔曼滤波的电动汽车剩余续航里程估算[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2017,38(1):28-33.
- [14] 郝雄博. 基于电池SOC状态和未来能耗预测的电动汽车续航里程估计[D]. 长春:吉林大学,2016.