

电动车动力系统测试平台的设计与实现

韩福江, 冀明路, 蒋 众, 孙志红, 徐海东
(北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

摘 要: 采用模块化设计方法研制了一套大功率、宽转速的电动车动力系统测试平台, 可针对不同类型的电动汽车驱动电机、控制器和动力总成等进行单部件及系统测试, 可适应不同通信协议的电机 CAN 通信配置, 且可进行自定义路况试验(包含电惯量模拟)。主要从测试平台总体设计原理, 测试平台测控系统设计和试验结果分析 3 个方面进行分析。结果表明, 该测试平台能够满足不同类型的宽转速范围的电机及控制器的测试需求。

关键词: 电动车动力; 测试平台; 电惯量; 自定义路况; 控制器

中图分类号: U 469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)02-0076-08

doi: 10.12177/emca.2020.198

Design and Implementation of Power System Test Platform for Electric Vehicle

HAN Fujiang, JI Minglu, JIANG Zhong, SUN Zhihong, XU Haidong
(Beijing Space Launch Technology Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: A set of high-power and wide-speed-range test platform for electric vehicle power system is developed by using modular design method. It can perform single component and system testing for different types of electric vehicle drive motors, controllers, and powertrains. It can adapt to the CAN configuration of different communication protocols, and can carry out custom road tests (including electric inertia simulation). The overall design principle of the test platform, the design of the measurement and control system of the test platform, and the analysis of the test results are given detailedly. The results show that the test platform can meet the test requirements of different types of motors and controllers with wide speed range.

Key words: electric vehicle power; test platform; electric inertia; custom road condition; controller

0 引 言

目前, 国内外大力发展电动车产业, 因此作为电动车关键组成部分的动力驱动系统测试技术已经成为研究热点^[1]。电动车驱动系统工作原理有别于传统车辆, 其驱动电机和控制器特有的性能参数是影响整车性能的关键^[2]。因此, 进行电动车动力驱动系统测试是电动车开发中必不可少的环节。

早期的动力驱动系统测试平台较为简易, 一般用机械飞轮组合模拟车辆惯量, 存在级差且大

惯量模拟时转速范围较低等缺点^[3]。此外, 传统测试平台的调速范围较小, 难以对复杂车辆工况进行测试。而且缺乏测量电机电压、电流、功率因数等电学性能的手段, 无法有效地稳定驱动电机的动力电源^[4-6]。因此, 开发一种能适应多种不同特性的电机测试平台是目前电动车测试部门的首要任务。

本文研制的电驱动力系统测试平台作为半实物模拟试验测试系统^[7-8], 采用模块化设计, 单部件测试可针对不同类型驱动电机及控制器、动力电池等部件进行测试; 同时可针对动力总成进行

收稿日期: 2020-11-18; 收到修改稿日期: 2020-12-27

作者简介: 韩福江(1976—), 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源汽车试验测试技术。

联调测试,且可进行自定义路况试验^[9]。基于车辆控制器局域网总线(CAN)的通信模式^[10],可针对不同动力驱动系统快速灵活配置。根据电机的最高转速,试验台架有2种不同的布置方式,能够适应低转速高扭矩以及高转速低扭矩的极端工况^[11-13]。同时,将功率分析仪等测量仪器集成在测试平台中,用于采集与分析动力驱动系统的电机性能和控制器性能的测试数据^[14-16]。

1 测试平台模块化设计

电动车动力系统测试平台组成如图1所示。整个测试平台主要由测功机系统、变速器、扭矩仪、被测电机系统、被测电机供电系统、冷却系统、测控系统、辅助支架等组成。被测电机最高转速介于2 800~9 000 r/min之间,可进行工作转速在较大范围内的电动车动力系统测试。

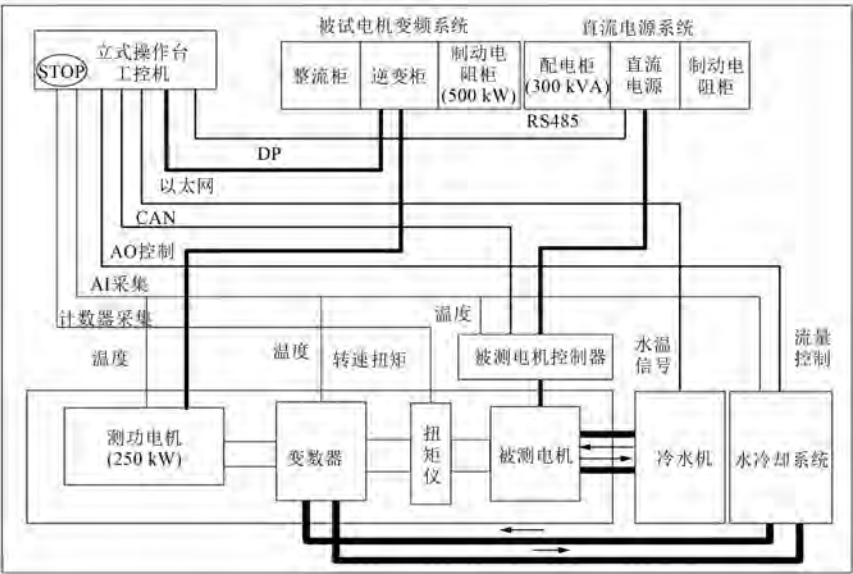


图1 电动车动力系统测试平台组成

1.1 测试平台布置

测试台架分为直连模式、非直连模式适应低转速和高转速的宽速范围动力系统测试。实物布置图如图2所示。

直连模式下,测功电机与被测电机通过联轴器直接相连,可进行大扭矩重载电机的测试。

非直连模式下,测功电机与被测电机间通过变速箱传动,实现高转速工况下的测试。该工况下,测功机经变速箱与被测电机连接,最高转速达到10 000 r/min,超过被测电机最高转速9 000 r/min,符合测试平台要求。变速箱具体参数如表1所示。

1.2 测功机系统

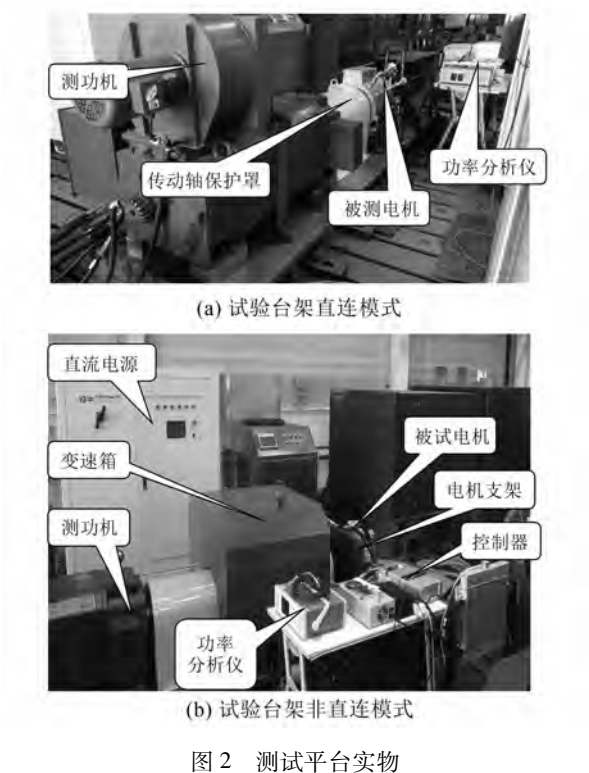
测试平台利用250 kW电力测功机、ABB交流变频系统及风冷制动电阻柜组成测功机系统。测功机系统最大输出转速为3 800 r/min,最高输出扭矩为4 700 N·m。

表1 变速箱具体参数

参数名称	参数值
传动比	3.034:1
额定传递功率/kW	250
高速轴最高转速/(r·min ⁻¹)	10 000
低速轴最高转速/(r·min ⁻¹)	3 800
最大扭矩/(N·m)	4 700

1.3 直流电源

被测电机供电单元采用TN-QCZ04电动车电机控制电源,直流电压调节范围为DC50~800 V,电流调节范围为10~600 A。主要由升压变压器、电抗器、整流、直流调压部分等组成。系统试验时为电机及控制器供电通过RS485与PC机通信,智能监控电源。自带制动电阻单元,满足连续4 h 100 kW的放电功能。



1.4 功率分析仪

采用美国泰克公司 PA4000 功率分析仪对被测电机及控制器的性能参数进行采集分析。控制器输出的三相电压和直连母线输出的电压直接输入功率分析仪;直流母线电流通过霍尔电流传感器输入功率分析仪;输出端的三相电流通过电流钳输入功率分析仪。

2 测试平台的测控系统设计

测试平台通过测控系统根据试验要求对测功机和被测电机进行测试工况控制,同时通过传感器对转速、扭矩、电流、电压、温度等参数进行实时监控,记录测试数据并利用工控机配置软件开展数据分析。测控系统原理框图如图 3 所示。测试平台的测控系统分成主控系统部分和辅助系统部分。

2.1 主控系统

主控系统以工控机为控制核心,采用现场总线控制测功机系统和被测电机系统,实时接收试验操作人员的控制指令;通过现场控制器 PLC 作数据交换对辅助系统进行控制和状态监控;工控机扩展 PCI 插槽的多功能高精度采集卡可对现场传感器

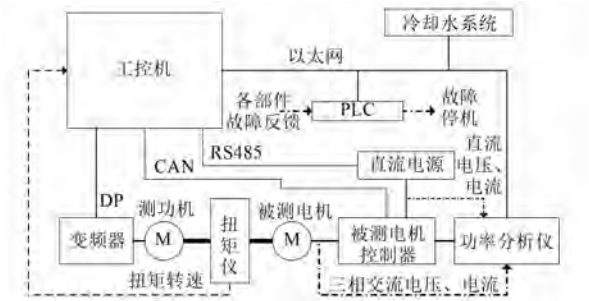


图 3 测控系统原理框图

转速、扭矩信号进行采集;直流母线电压电流信号和三相交流电压电流信号由功率分析仪处理后经以太网反馈至工控机。测试平台数据采集系统中主要测量参数的测量设备及精度,如表 2 所示。

表 2 数据采集参数及设备列表

参数名称	测量设备	精度
转速 $n_e/(r \cdot \min^{-1})$	扭矩仪	± 1
扭矩 $T_e/(N \cdot m)$	扭矩仪	$\pm 0.05\% FS$
母线电流 I_m/A	电流传感器	$\pm 0.02\% FS$
三相电流 I_f/A	电流钳	$\pm 0.05\% FS$
母线电压 U_m/V	功率分析仪	$\pm 0.05\% FS$
三相电压 U_f/V	功率分析仪	$\pm 0.05\% FS$
电源输出功率 P_m/W	功率分析仪	$\pm 0.05\% FS$
控制器输出功率 P_f/W	功率分析仪	$\pm 0.05\% FS$

2.2 辅助系统

辅助系统为试验系统提供辅助控制。其辅助控制核心为具备以太网通信功能的西门子 S7-1200 系列 PLC,控制液压站油泵电机和测功机风机等;采集辅助信号,如测功机轴承温度、变速箱轴承温度等;检测故障信号,起保护测试平台和被测电机作用。

2.3 CAN 通信配置

传统的电机测试平台不具备与被测电机进行通信的功能,若被测电机和控制器发生故障报警,无法自动停止,存在安全隐患。测试系统要检测被测电机的故障反馈,需要建立两者之间的通信^[17]。本文测试平台与被测电机及控制器间为 CAN 总线通信,符合 J1939 协议要求,但是其中每一个数据位代表的量均会有相应的变化。传统试验平台一般只适配一种 CAN 协议,每次更改协议均需要程序员重新修改测试软件,极不方便。因

此,基于用户层开发了一个能适应多种 CAN 通信协议的配置系统,能够满足更多类型被测电机及控制器的试验。CAN 通信收发报文配置界面如图 4、图 5 所示。

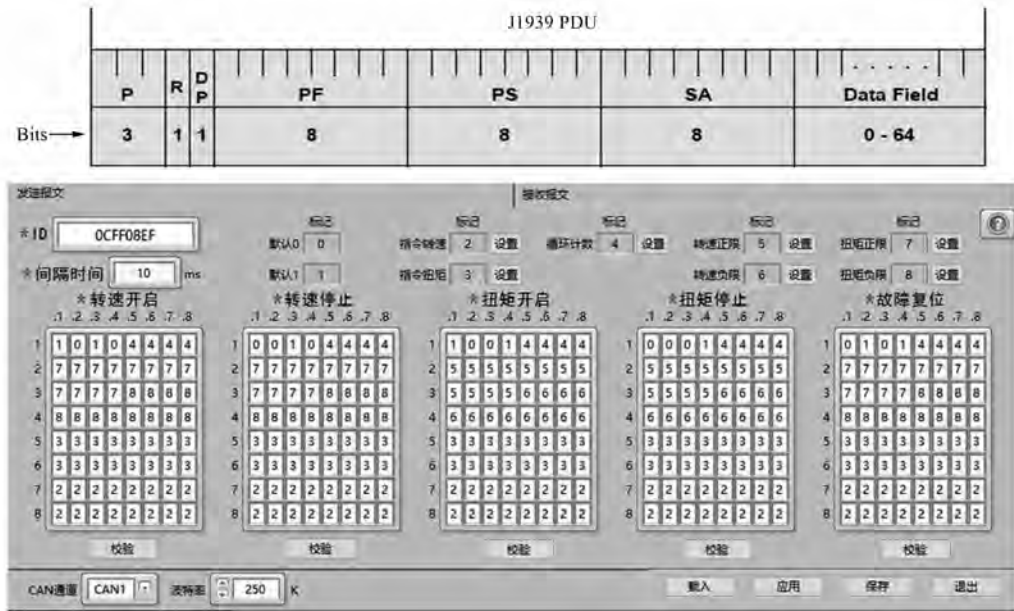


图 4 发送报文配置



图 5 接收报文配置

CAN 协议配置主要对 CAN 发送报文和接收报文进行配置,J1939 协议采用扩展帧 29 位标识符,应用 PDU 格式,由 P(优先级)、R(=0)、DP(=0)、PF(=255)、PS、SA(123-253)组成,data 数据位一共 64 位。

CAN 报文含有地址 ID、间隔时间和数据。其中,对 64 位的数据是配置的关键。发送报文中,

将指令转速和指令扭矩等参数模块化,可以设置这些参数的比例和偏移量,并以数字代号“0”…“8”表示发送报文中的设定参数。可将自定义转速开启、转速停止、扭矩开启、扭矩停止、故障复位等指令中填入相应的参数代号。接收报文中,将读取的实际转速和实际扭矩等参数模块化,以数字“0”…“47”表示接收报文中的读取参数。可对

3 种不同类型的 CAN 接收报文协议进行配置。

3 测试平台试验功能

该测试平台具有开展多种试验的功能,包括:(1)电机带控制器空载运行试验;(2)电机带控制器负载运行试验;(3)电机带控制器堵转试验;(4)电机带控制器负载热试验;(5)能量回馈试验;(6)自定义道路工况模拟加载试验;(7)电惯量模拟试验;(8)动力总成联调试验。本文主要对被测电机负载运行试验、能量回馈试验、效率分析、电惯量模拟试验和负载热试验进行测试功能的介绍^[18]。

3.1 负载运行试验

电动车要求动力驱动系统输出特性曲线包括 2 个工作区:基速以上的恒转矩区,保证电动车的载重和低速加速能力;基速以下的恒功率区,保证电动车有充足的高速行驶和加速空间。因此,需要选择合适的转速转矩工作点测试电机驱动特性。负载运行试验中,测功机输出正转速,被测电机输出正扭矩。被测电机带动测功机进行运转,处于电动状态。

本文针对 18 kW 电机,选取额定电压 325 V(电动)、过电压 400 V(电动)、欠电压 250 V(电动)3 个典型状态下的特性曲线进行分析。电动工况下,500~8 000 r/min 每间隔 500 r/min 取一个转速点,恒转速区每个转速点下 0~180 N·m 间隔 10 N·m 为一个转速转矩点;恒功率区每个转速点下从 0 至最大转矩间隔 10 N·m 为一个转速转矩点,每个转速转矩点记录电机转矩、转速、电流和电压等参数。

3.2 能量回馈试验

能量回馈试验是模拟制动过程中,测试被测电机处于发电状态下的工作性能。测试过程中,测功机给定正转速,被测电机输出负扭矩。测功机带动被测电机运转,处于发电状态。发电工况,直流电源输出 325 V。500~8 000 r/min 间隔 500 r/min 取一个转速点,恒转速区每个转速点下 0~-180 N·m 间隔 -10 N·m 为一个转速转矩点;恒功率区每个转速点下从 0 至最大转矩间隔 -10 N·m 为一个转速转矩点,每个转速转矩点记录电机转矩、转速、电流和电压等参数,特性曲线如图 6 所示。

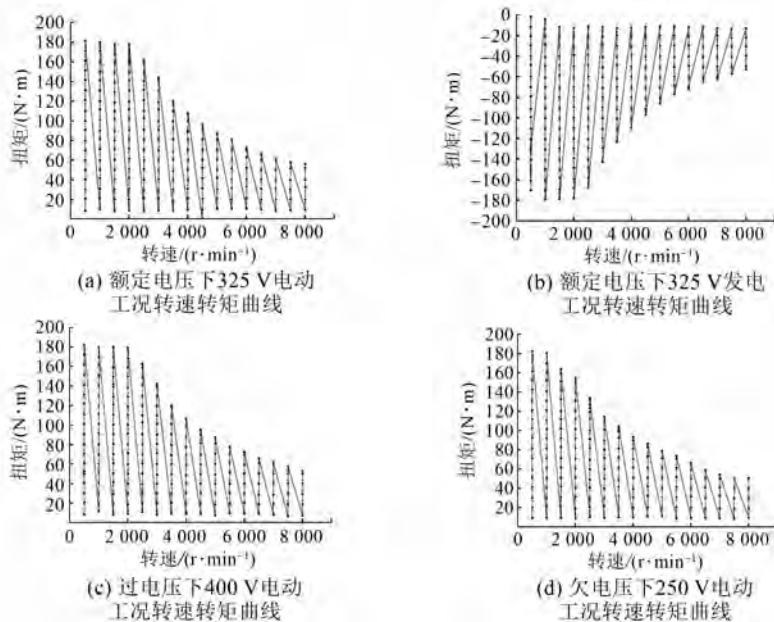


图 6 18 kW 电机转速转矩特性曲线

由图 6 可知,过压的电机特性曲线与额定电压的电机特性曲线基本吻合。额定电压状态和过压状态的恒转矩速段为 0~2 000 r/min;欠电压状

态的恒转矩速段为 0~1 000 r/min,电机的负载能力明显下降。恒功率区欠压状态的最大扭矩明显小于额定电压状态和过压状态的最大扭矩。由此

推断恒功率区段欠压的输出最大功率小于额定电压和过压的最大功率。发电状态恒转速区段为 0~2 000 r/min, 与额定电压下电动状态时的特性曲线基本对称。

3.3 效率分析

电机的效率特性是整车厂选择电机和整车控制系统开发的关键参数, 可以验证电动车辆及其驱动、控制装置的开发和测试设计的正确性, 评估其性能指标能否满足设计要求。其中, 效率参数主要包括电机本体效率、电机逆变器效率和电机系统效率。本文主要对电机系统效率进行处理和分析。

电机输出功率计算式:

$$P_e = \frac{T_e \cdot n_e}{9\,550} \quad (1)$$

电机控制器输出功率计算式:

$$P_f = 3U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

直流电源输出功率计算式:

$$P_m = U_m \cdot I_m \quad (3)$$

电动工况电机系统效率计算式:

$$\eta_1 = \frac{P_e}{P_m} \times 100\% \quad (4)$$

发电工况电机系统效率计算式:

$$\eta_2 = \frac{P_m}{P_e} \times 100\% \quad (5)$$

式中: P_e 为电机输出功率; T_e 、 n_e 为电机输出端扭矩和转速; P_f 为电机控制器输出功率; U_f 、 I_f 为电机控制器输出相电压和相电流; $\cos \varphi$ 为功率因数; P_m 为直流电源输出功率; U_m 、 I_m 为直流电源输出直流电压和电流; η_1 、 η_2 为电机在电动和发电工况下的系统效率。

电机 MAP 图 (又叫等高线图、云图) 是电机测试时生成的一种数据曲线图, 主要是反映在不同转速、扭矩下的电机效率分布情况^[19]。本文采用 MAP 图对 4 种不同工况下 18 kW 电机及控制器的系统效率进行分析, 结果如图 7~图 10 所示。

从图 7 可以看出, 额定电压下, 当电机处于 4 000 r/min、100 N·m 区域, 驱动系统的效率最高, 达到 94%; 当电机处于低速运行时 (0~1 500 r/min) 和低扭矩运行时 (0~30 N·m) 效率比较低。高效区 (效率在 85% 以上) 电机转速范围在 1 500~7 000 r/min 范围内。可见, 驱动系统

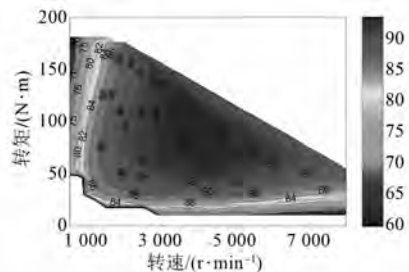


图7 额定电压 MAP 图

的高效区工作转速范围较大, 基本可以满足电动汽车整车性能工况要求。

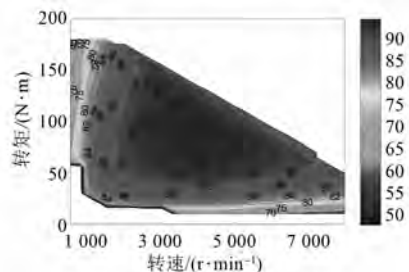


图8 过压 MAP 图

从图 8 可以看出, 过压状态下, 当电机处于 4 000 r/min/90 N·m 区域, 驱动系统的效率最高, 达到 93%; 当电机处于低速运行 (0~1 500 r/min) 和低扭矩运行 (0~30 N·m) 时效率比较低。高效区电机转速范围在 1 500~7 000 r/min 范围内。与额定电压相比, 过压状态下驱动系统相同转速扭矩点的工作效率更低。

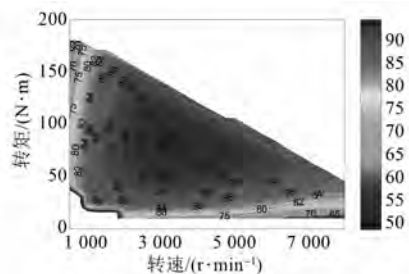


图9 欠压 MAP 图

从图 9 可以看出, 欠压状态下, 最高扭矩从 1 000 r/min 开始明显下降, 说明欠压时电机驱动负载能力下降。当电机处于 3 500 r/min/80 N·m 区域, 驱动效率最高, 达到 94%。高效区电机转速范围在 1 500~6 500 r/min 范围内。可见, 驱动系统的高效区工作转速范围较大, 基本可以满足

电动汽车整车性能工况要求。

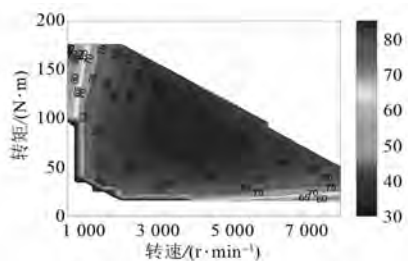


图 10 能量回馈下的 MAP 图

从图 10 可以看出,当电机处于 4 000 r/min、100 N·m 区域,驱动系统的效率最高,达到 87%;高效区(效率在 85% 以上)的范围不足一半。由此可知,驱动系统能量回馈效率较低。

3.4 电惯量试验

传统的测试平台应用机械惯量模拟车辆行驶中的运动惯量,精度低且存在级差。为此基于电惯量模拟技术,通过将车辆运动惯量折算到测功机轴的惯量,以模拟各种复杂路况下的车辆惯量^[20]。

驱动系统电机端通过转速控制进行升速试验:驱动单元从 0 加速到额定转速 500 r/min;减

速试验:驱动单元从额定转速 500 r/min 减速至 0。试验过程通过设定电机加速时间,保证升速加速度为 20 (r/min)/s,减速加速度为 -20 (r/min)/s。

加载单元电机端分别进行 2.171、4.343、6.516、7.602 kg·m² 的电惯量模拟试验,并记录升速过程和减速过程中加载单元电机扭矩以及被测电机端的扭矩。加载单元电机端力矩即为电惯量模拟时附加的惯性力矩,其理论计算式如下:

$$T_j = \left[T_0 + \frac{2\pi}{60} \cdot (J - J_0) \cdot \alpha \right] \cdot i \quad (6)$$

式中: T_j 为测功机输出惯性力矩; T_0 为给定扭矩值; J 为模拟惯量; J_0 为原系统惯量; α 为被测电机加速度; i 为传动比, $i = -3.034$ 。

忽略阻力矩,有:

$$T_1 = T_0 + \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \alpha \quad (7)$$

式中: T_1 为被测电机端扭矩。

被测电机驱动台架从 0 升速至额定转速 500 r/min,再驱动台架由 500 r/min 减速至 0,全过程中测功机根据要求进行不同的电惯量模拟加载。由此可以得到不同电惯量下的特性曲线,如图 11 所示。

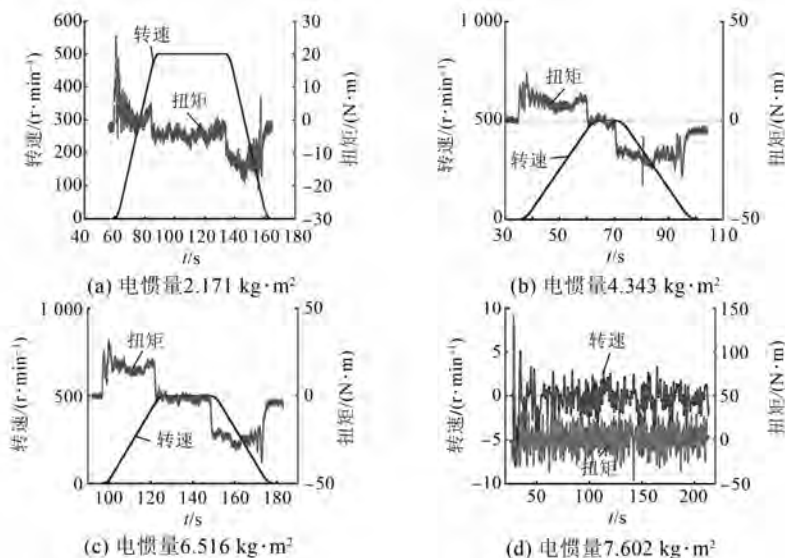


图 11 电惯量测试

图 11 分别为 2.171、4.343、6.516、7.602 kg·m² 的电惯量模拟结果。根据试验结果可以看出,在升减速阶段,测量得到的扭矩值在不同电惯量模拟工况下出现明显不同,随着模拟惯量的增大,需

要更大的扭矩完成加减速过程,随着给定模拟惯量值的增大,测功机输出惯量模拟力矩与理论计算值的变化趋势一致,测功机电惯量模拟功能良好,因此可根据不同工况下车辆运动惯量调整电

惯量进行模拟。此外,测功电机所模拟的惯量越大,被测电机转速控制稳定性越低。当系统进行大惯量模拟时,出现速度波动是正常的;当模拟惯量超过一定范围,被测电机转速控制将无法稳定。

3.5 温升试验

电机温升通常指额定负载下绕组的温升。不同绝缘等级的电机绕组有不同的温升限制,为了保证行驶工况下的电机寿命,需考察驱动电机的温升特性。此外,电机控制器是电动车驱动系统的核心部件,须具有耐高温、高可靠性和高集成度的特点,因此需考察控制器的耐高温性能。

选择在额定转速为 3 000 r/min,额定扭矩为 57 N·m 工况下进行温升试验。通过数据采集系统自动采集存储试验数据,电机及控制器温升试验结果如图 12 所示。

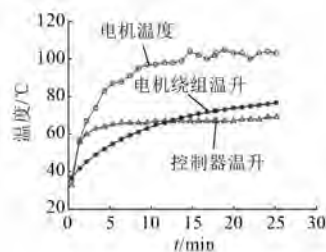


图 12 电机及控制器温升试验结果

由图 12 可以看出,随着运行时间增长,温度出现增大趋势。其中,控制器在稳定运行后温升幅度相对较小,而电机绕组和电机温度的温升幅值较大。

4 结 语

(1) 本文测试平台采用模块化设计能实现宽转速范围(0~10 000 r/min)的电机试验。

(2) 针对 CAN 通信协议不同的电机控制器,该试验系统能实现通信协议的自主配置,可适应多种类型控制器。

(3) 该测试平台能完成不同类型的电机及控制器的性能试验,且可自动绘制电机效率 MAP 图分析其驱动性能。

【参 考 文 献】

[1] 柴海波,鄢治国,况明伟,等. 电动车驱动电机发展现状[J]. 微特电机,2013,41(4): 52.
[2] 刘忠途,伍庆龙,宗志坚. 基于台架模拟的纯电动

汽车能耗经济性研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2011,50(1): 44.

- [3] 王伟平,王斌,任纪良. 新能源汽车电机驱动系统环境可靠性测试研究[J]. 上海汽车,2013(2): 3.
[4] 高松,唐鹏,孙宾宾,等. 双电机驱动电动车动力系统试验平台设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2017,38(5): 20.
[5] 付翔,王红雷,黄斌,等. 电动汽车驱动系统测试台架设计[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2015,37(5): 571.
[6] 符荣,窦满峰. 电动汽车驱动用内置式永磁同步电机设计与实验研究[J]. 西北工业大学学报,2014,32(5): 737.
[7] YUAN X, ZHANG C, HONG G, et al. Method for evaluating the real-world driving energy consumptions of electric vehicles[J]. Energy,2017,141: 1955.
[8] 朱靖. 纯电动汽车驱动系统测试台的研究与开发[D]. 上海: 上海工程技术大学,2014.
[9] 杨旭. 电动汽车电机驱动系统实训台架设计及其故障试验[D]. 广州: 华南理工大学,2017.
[10] 李炯,张承宁,宋强,等. 基于 CAN 总线的电动汽车电机驱动系统测试平台开发[J]. 电机与控制应用,2006,33(4): 55.
[11] 王鑫正. 电动汽车电机驱动控制器关键性技术的研究和实现[D]. 沈阳: 沈阳工业大学,2015.
[12] 江元元. 电动汽车电驱动系统测试平台的设计与实现[D]. 株洲: 湖南工业大学,2014.
[13] 张显科. 电动汽车轮毂电机驱动控制器的研究[D]. 大连: 大连交通大学,2015.
[14] 张娇. 电动汽车驱动系统测试平台控制方法研究[D]. 北京: 北方工业大学,2014.
[15] 温云. 多目标混合遗传算法在永磁电机优化设计中的应用[D]. 北京: 华北电力大学,2017.
[16] 曹先庆. 混合动力电动汽车用永磁同步电动机驱动系统的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学,2008.
[17] 朱靖,陈舒燕,余朝刚. 基于 LabVIEW 的电动汽车驱动系统测试平台设计[J]. 化工自动化及仪表,2015(2): 199.
[18] 宋强,王再宙,王志福,等. 基于虚拟仪器的电动汽车牵引电机性能测试系统[J]. 仪器仪表学报,2007,28(11): 2019.
[19] 宋强,李松,SAEID H. 无储能单元串联式电传动车辆直流母线电压鲁棒控制的研究[J]. 汽车工程,2017,39(8): 935.
[20] 王记磊,杨坤,王杰,等. 新能源汽车动力电机测试平台设计[J]. 汽车工程学报,2017,7(6): 407.