

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.017

# 新能源汽车电驱动系统能耗检测方法 及评价体系研究<sup>\*</sup>

谢秋慧<sup>1</sup>, 张 昊<sup>1</sup>, 童 珅<sup>2</sup>, 周 洋<sup>2</sup>, 杨 帆<sup>2</sup>

(1. 上海出入境检验检疫局, 上海 200002; 2. 上海大众汽车有限公司, 上海 200002)

**摘要:**针对新能源汽车电驱部分的能耗问题,对电驱系统相关检测方法和评价指标进行了研究,提出了针对新能源汽车不同工况条件下的电机及其控制器能耗检测和评价指标。对新能源汽车整车节能技术进行了归纳,分析了电驱系统在不同工况条件下的能耗特征,阐述了电驱系统的性能参数对不同整车节能工况的影响。对电驱系统的电气原理图进行了简单分析,提出了对系统能量回收过程的工作范围和转换效率都有着重要影响的电机漏感等技术参数。利用课题设计的电机检测台架对具体的电机及其控制器产品进行试验,得出了不同转速和转矩条件下电驱系统的能量转换效率,分析了不同节能工况条件下电驱系统的典型效率值。研究表明,基于不同整车工况的电驱系统综合能耗检测方法对降低新能源汽车能耗有着重要意义。

**关键词:**新能源汽车电驱动系统;能耗指标;整车节能工况

中图分类号:U469.72; TM306; TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)04-0464-06

## Testing method and evaluation system for energy consumption of motor drive system in newenergy vehicles

XIE Qiu-hui<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, TONG Zhen<sup>2</sup>, ZHOU Yang<sup>2</sup>, YANG Fan<sup>2</sup>

(1. Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shanghai 200002, China;

2. Shanghai Volkswagen Automotive Company, Shanghai 201805, China)

**Abstract:** Aiming at the energy consumption of new energy vehicles, testing methods and the evaluation index of motor drive systems were studied, and different evaluation indexes of motors and its controllers were proposed for new energy vehicles under different operating conditions. Based on the summary of energy saving technologies of new energy vehicles, energy consumption characteristics of motor drive system were analyzed and the influence on different energy saving condition of the parameters was described. After a simple analysis of the electrical diagram of a electric motor system, parameters including with motor leakage value were important to the operating range and conversion efficiency of the system energy recovery mode. The specific motor and its controller were tested by using the motor testing bench designed by the research group. The experimental results indicate that typical efficiency value of motor drive system under different energy saving mode can be calculated by the energy conversion efficiency distribution map. The research results indicate that the comprehensive energy consumption test method based on different vehicle conditions is of great significance to reduce the energy consumption of new energy vehicles.

**Key words:** mtor drive system in new energy vehicles; energy consumption indexes; vehicle energy saving mode

收稿日期:2015-11-10

基金项目:上海检验检疫局科技计划资助项目(HK038-2014)

作者简介:谢秋慧(1962-),男,浙江绍兴人,硕士学历,主要从事进出口工业品检验监管方面的研究. E-mail: xieqh@shciq.gov.cn

通信联系人:张昊,男,硕士学历. E-mail: zhangh@shciq.gov.cn

## 0 引言

2012年国务院发布的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》明确了到2020年乘用车新车平均燃料消耗量降至百公里5.0 L以下。为了实现国务院提出的2020年油耗目标,国家质检总局会不断修改并降低汽车的能耗标准。汽车厂商必须相应发展新的汽车节能技术,特别是新能源汽车技术,增加新能源汽车的生产比重。新能源汽车包含纯电动汽车、燃料电池汽车和混合动力汽车3个主要产品类型,根据产品的结构和原理还存在很多细分类型。但究其原理,不同新能源汽车相比传统内燃汽车的区别都是动力系统和能量储存介质的变化。动力部分就是将电驱动系统介入或者取代原有的内燃机方案,而能量储存介质的设计主要是增加了动力电池和燃料电池两种可选方式。

电驱系统作为新能源汽车的动力系统的核心部件,国家质检总局已经出台了相关国家标准《电动汽车用电机及其控制器》(GB/T 18488.1—2006)。电机及控制器构成的电驱系统不仅对整车的纯电动续航里程数有着重要影响,而且关系到混动汽车燃油经济性的问题。

笔者对电驱系统相关检测方法和评价指标进行研究,提出针对新能源汽车不同工况条件下的电机及其控制器能耗检测和评价指标。

## 1 整车能耗评价方法

混动汽车和电动汽车动力系统框图如图1所示。

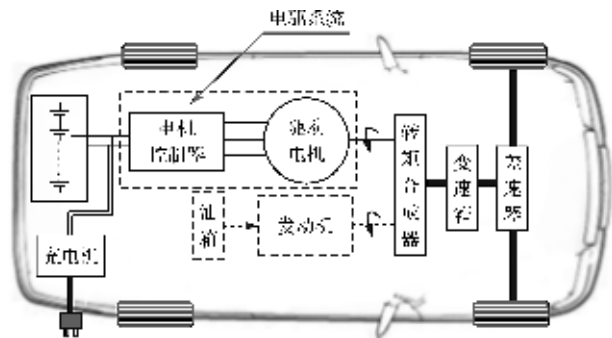


图1 混动汽车和电动汽车动力系统框图

混合动力汽车需要消耗电能和汽油两种能量介质,插电式混动汽车的部分电能还来自于电网充电。针对电动汽车国家颁布了标准 GB/T 18386—2005 作为其能耗标准的试验方法,针对混合动力汽车能耗试验方法,目前国家质检总局已经颁布了 GB/T 19753 和 GB/T 19754 两套标准,而针对混合动力汽车的能耗强制标准 GB 22757.2 目前还在审稿阶段。而燃料电池汽车目前还没有专门的能耗标准。

图1中,电驱动系统主要由电机和电机控制器组成。电机控制器也可以称为电力电子控制器(Power Electronic Unit, PEU)。关于混合动力汽车的能耗检测方法就需要将电能和燃油消耗量之间做一个等效的换算<sup>[1]</sup>,这个等效换算对于电驱系统能耗评价也是非常有意义的。将电能简单换算成燃油消耗量的公式如下所示:

$$\begin{cases} NEC = \int U \times Idt = SoC \times C \times \Delta U \\ V_e = NEC \times \eta_m / (D_{fuel} \times Q_{fuel} \times \eta_{eng}) \\ V_w = V_{fuel} + V_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\eta_m$ —电驱系统电能到机械能的转换效率, $\eta_{eng}$ —发动机燃料燃烧后能来转换效率, $D_{fuel}$ —燃料密度, $Q_{fuel}$ —单位质量燃料的能量比。

式(1)分为3条公式,其中第一条是测算电池中的电能增量 $NEC$ ,第二条是将 $NEC$ 简单换算成燃油消耗量 $V_e$ (单位为L),第三条是将实际燃油消耗量 $V_{fuel}$ 与 $V_e$ 相加得到等效的燃油消耗量 $V_w$ 。如式(1)所示,测定 $NEC$ 的方法有两种,一种是通过电池电压 $U$ 和电流 $I$ 实时积分计算得到,另一种是在车辆测试前后分别测定电池的电量百分比 $SoC$ ,根据这个数据估算消耗的电能。

新能源汽车整车涉及到油和电之间能量转换的问题,而混动汽车中的电驱系统能耗指标也是涉及这问题。电驱部分的工作效率对于其能耗指标来讲非常重要,常规的电机产品会标定额定效率值。在新能源汽车中,电机部件需要经受各种工况的检验,其转矩和转速的工作范围非常宽广,因此仅采用额定效率是不能全面反映电驱系统的能耗情况<sup>[2]</sup>。

## 2 台架测试方案

驱动电机及控制器测试台架示意图如图2所示。

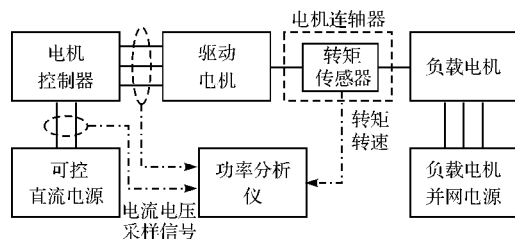


图2 驱动电机及控制器测试台架示意图

因为适用于新源汽车的电机和PEU的种类非常多,单一台架无法满足所有种类的单个电机和单个PEU的测试。另一方面,对电机和PEU分别进行单独测试也是无法反映整个电驱系统的性能,电驱系统测试台架是将电机和PEU作为一个整体进行检测<sup>[3-4]</sup>。

电驱系统的输入一般是直流电源和来自 ECU (electronic control unit)的总线指令信号,其中 ECU 的信号采用半实物仿真设备模拟;电驱系统输出是电机输出的机械转矩。按照这个思路设计测试台架,输入电源可以采用可控直流电源,也可以采用更先进的电池模拟器。考虑到能量回收工况的测试要求电机测试台架中电机负载一般不采用磁滞制动器、电涡流制动等能量消耗的方案,而采用基于负载电机的测试方案,这种方案可以大大减小测试能耗,并且可以方便进行驱动电机的发电试验和再生制动试验。

图 2 中,在电驱系统检测台架中,本研究选用功率分析仪对 PEU 的输入端电功率,电机的输入端电功率,电机轴输出机械功率和负载电机输出电功率进行监控。负载电机及其控制器可以快速的动态加载负载阻力矩或者输出力矩,可以在电驱动和发电两种工况下进行切换,准确地模拟电驱系统在整车中负载情况。

### 3 检测对象和内容

#### 3.1 新能源整车节能工况

新能源汽车节能技术如表 1 所示。

表 1 新能源汽车节能技术

|        | HEV | PHEV | E-REV | EV |
|--------|-----|------|-------|----|
| 制动能量回收 | √   | √    | √     | √  |
| 智能起停   | √   | √    | √     | √  |
| 电机助力   | √   | √    |       |    |
| 短距离电驱  | √   | √    | √     | √  |
| 城市路况电驱 |     | √    | √     | √  |
| 长距离电驱  |     |      | √     | √  |
| 加速辅助   | √   | √    |       |    |
| 滑行辅助   | √   | √    |       |    |
| 行车发电   | √   | √    | √     |    |
| 外接充电   |     | √    | √     | √  |

不同种类的新能源汽车具有不同的节能技术。表 1 中间对不同类型的新能源汽车采用英文缩写的形式,其中 HEV、PHEV 和 EV 分别是混动、插电式混动和纯电动汽车的简称,而 E-REV 是增程式电动汽车的缩写。

下面将表 1 中的各项节能技术作以下简单介绍:  
(1) 制动能量回收

制动能量回收系统 (braking energy recovery system, BRS) 是新能源汽车回收刹车过程制动能量的装置,它是将车辆刹车过程中原本消耗在刹车片上的能量通过电机发电工作模式回收 到 电池 或者 电容 等 能量

存储介质中。根据有关的统计数据<sup>[5]</sup>,在典型城市路况的行驶过程中,制动能量可以达到总牵引能量的 34% 以上,而在一些比如上海和纽约等大城市中这个数据可能超过 80%。新能源汽车在刹车过程中需要将制动能量回收与液压制动进行协调控制,制动过程中的能量回收率是影响新能源汽车能耗的主要参数之一。

##### (2) 智能起停

传统内燃机汽车启动过程需要获得较高的转矩,往往需要驾驶员猛踩油门。这就造成了发动机过浓喷油,降低了燃油经济性。新能源汽车的电机能够在车辆启动过程中提供大量转矩,避免发动机过浓喷油。

##### (3) 行驶过程电机助力

发动机在确定转速条件下都有一个效率最佳的工作点,在这个工作点要求输出转矩保持恒定,而电驱动系统是具有宽广的高效率工作区域,能够实现快速的转矩调节。利用两种动力源在不同特点,可以大大减少车辆行驶能耗。这个技术也被称为新能源汽车的发动机工况优化技术。

##### (4) 加速辅助

当混动汽车加速过程中,电机 会 配合 发 动 机 提 供 额 外 的 峰 值 转 矩,避免加速过程中的过浓喷油。

##### (5) 滑行辅助

在车辆滑行或者下坡过程中,如果油门被松开或者刹车被轻踩,系统会停止发动机的运转,依靠车辆惯性滑行。滑行辅助可以大大减少混动汽车发动机怠速能耗。

##### (6) 行车充电

行车充电就是在车辆行驶过程中由内燃机带动电机或者专用发电机对车内的动力电池进行充电,行车充电的效率对整车能耗有着重要影响。

##### (7) 短距离纯电动驾驶

对大部分的新能源汽车都可以进行短距离的纯电动驾驶,国家对于纯电动驾驶的最短距离也将会有更严格的强制标准。

##### (8) 城市路况纯电动驾驶

城市路况纯电动驾驶可以有力减小机动车尾气带来的城市空气污染问题。车辆检测设计专门的循环工况,相对应的汽车电驱部分也需要有类似的循环工况来满足城市路况检测问题。

##### (9) 外接充电

大部分新能源汽车都配有储能电池,在车辆停止状态下可以对电池进行充电。充入新能源汽车电池的电能是来自于电网中风电和太阳能等清洁能源还是来

自于电网中火电厂矿石燃烧,很大程度上决定了整车的实际综合能耗。

3.2 电驱动系统及其能耗情况

新能源汽车电驱动系统典型电路图如图 3 所示。电驱动系统主要由电机和电力电子控制器组成,其中电力电子控制器被简称为 PEU(power electronic unit)。新能源汽车中电力电子控制器包含 DCAC 变换器(电机控制器)、ACDC 变换器(车载充电机)和 DCDC 变换器(车内辅助电源),部分车型还配有备用逆变电源等电力电子控制器部件。实际 PEU 部件可能是包含以上几个不同功能控制器的总成。本研究讨论的 PEU 是指的电机驱动部分的功能和性能检测问题。

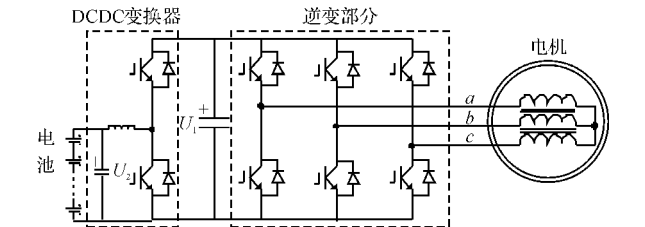


图 3 新能源汽车电驱动系统典型电路图

电机部分损耗主要来自于电机定子绕组的铜耗和电机磁密变化引起的铁磁耗。铜耗与电机电流大小有关;铁耗与电压的幅值和频率有关。PEU 的损耗主要来自电力电子器件。电机和 PEU 的效率值可以基于图 2 的测试台架方案进行测定,目前标准测试台架的基本功能都是对电机不同转矩和转速的工作点的效率值进行测定,从而构成一张连续的效率分布图。

综合各个部分损耗,电机的典型效率值根据工况不同在 80%~96% 之间波动,而 PEU 的典型效率值在 90%~99% 之间波动。从产品的典型效率值来看,电驱系统中 PEU 的效率值要高于电机的效率,而实际检测工作不能忽略 PEU 的作用,必须将 PEU 和电机作为一个整体进行检测。

4 模拟工况下电驱系统的检测

对新能源汽车电驱系统的检测,更应该注重系统在整车节能工况下的性能表现。在具体的检测过程中,可以依靠检测台架模拟整车工况下的电驱系统的运行状态。

4.1 不同工况下的能耗检测

本研究 3.1 节介绍的各种整车工况下电机的工作区域分布情况如图 4 所示。

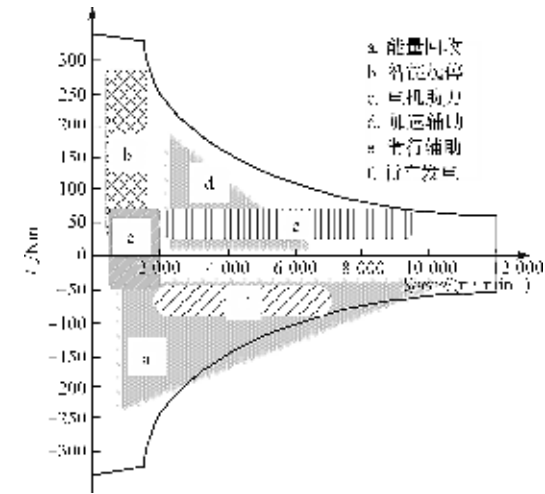


图 4 各个工况的工作范围分布

通过目前标准电机测试台架可以测定图 4 对应的电机效率分布图,如图 5 所示。

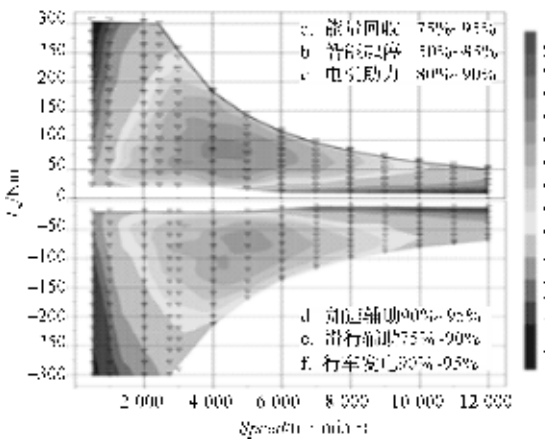


图 5 电驱系统效率分布图(a~f 工况对应区域参照图 4)

对比图 4 和图 5 可以分析到每一种运行工况下电机的效率情况。除了不同节能工况条件下电驱系统的效率分布情况,电驱系统的其他性能参数对这些整车节能技术也是有非常关键的作用。

在混动汽车行驶过程中,整个动力系统的输出转矩会随着路况、风阻和驾驶员踏板信号等因素快速的波动。混动汽车行驶过程需要保持发动机始终运行在最佳效率点或者最佳效率范围内。这就需要电驱系统在车辆行驶过程中,根据车辆 ECU 的转矩指令快速调节转矩。在保证发动机稳定工作在最佳效率点的前提下,电驱系统输出转矩调节精度和响应速度将决定车辆动力性和平顺性的水平指标。

不同工况下,与电驱系统能耗相关的性能如表 2 所示。

表 2 不同工况下电驱系统能耗相关性能指标

| 工况   | 电驱系统相关指标               |
|------|------------------------|
| 能量回收 | 不同工况条件下馈电效率系统实现馈电的运行范围 |
| 智能起停 | 低速状态下启动转矩,散热特性         |
| 电机助力 | 转矩调节速度和精度              |
| 加速辅助 | 全速范围最大扭矩及响应速度          |
| 滑行辅助 | 小转矩输出或能量回收             |
| 行车发电 | 不同稳态转速下对电池的充电效率        |

在混动汽车启动过程中,通常由电机单独进行启动工作。但车辆速度超过 30 km/h,内燃发动机会根据 ECU 的指令要求参与到车辆驱动运行中。这就避免发动机在启动过程中运行在低效区域或者出现过浓喷油。智能启动过程要求电驱系统在静止或者低转速状态提供足够启动转矩,也就是需要检测电驱系统在低速状态下的最大启动转矩和转矩响应速度。此外,启动或者加速过程中电机和电驱系统中的电流非常大,其散热不仅关系到整车能耗水平,而且关系到整车安全运行的重要问题。维持启动或者加速过程中峰值功率与峰值转矩所需要的散热设计超过维持电驱系统普通功率和转矩的散热设计。启动和加速过程产生的温升,会使得电驱系统中电机和 PEU 的稳态运行效率降低。

在车辆滑行过程,根据 ECU 指令电驱系统有可能工作在电动状态,也可能工作在能量回收制动状态。虽然这两种工况下电机出力并不大,但是这两种工况在实际车辆行驶过程中出现的概率都非常高,持续时间都比较长。因此,检测电驱系统在低转矩条件下转矩控制精度和能量回收效率,对于整车节能性也是非常有意义的。

4.2 能量回收过程中需要考虑的参数

能量回收技术对整车节能性的贡献比例最高的技术之一。国标 GB/T 18488.1 对电驱系统(电机及其控制器)的馈电效率 $\eta_{reg}$ 进行了定义,它是反映制动过程的能量回收效率的重要参数。标准 GB/T 18488.1 中对产品馈电效率只是提出了“具体在产品标准中规定”,在标准 GB/T 18488.2 提出了两种馈电效率的试验方法。其中一种通过整车试验测定,另一种是通过特殊的飞轮装置测定。在整车测试方案中,测定 $\eta_{reg}$ 的公式如下式所示:

$$\eta_{reg} = \frac{2 \times NEC}{m(V_1^2 - V_2^2)} \tag{2}$$

式中: $m$ —车辆的质量; $V_1, V_2$ —车辆测试过程初速度和末速度; $NEC$ —电池中电能增量,如式(1)所示。

馈电效率 $\eta_{reg}$ 的测定结构受到很多变量因素的影响。刹车初速度,刹车时间,前后轮制动力分配,电驱系统的制动功率等因素都会使得馈电效率的测定结果出现很大的变化<sup>[6]</sup>。考察电驱系统的馈电效率可以从系统基本电气原理的角度进行分析。

当汽车处于能量回收过程中,前轮驱动电机工作在发电状态。如图 3 所示,电机三相电压 $U_{abc}$ 经过交流变换器转换为直流母线 1,电压为 $U_1$ ;母线 1 经过 DCDC 变换器降压转换为直流母线 2,母线电压为 $U_2$ 。能量回收过程中,需要保证三相电源 $U_{abc}$ 中的线电压峰值必须大于 $U_1, U_1$ 必须大于 $U_2$ 。在车速比较慢的情况下,上述条件是无法保证的。

实际工况中当发生再生制动过程时,电机和控制器电路中的电流因为电路中电感的效应不可能马上反向,绕组电流的变化率受限于电机的漏感参数。如果在电机的漏感过大, $U_{abc}$ 感应电压较小,那么电机中电流换向时间会比较长。这样在刹车过程结束时,电机中的电流还没有完成换向,即电机没有进入发电运行状态。这种情况的物理本质是在刹车过程刚开始的阶段,电机漏磁场中的能量继续维持电机工作在电动状态驱动车辆前进。相同电压和功率等级的同类型电机,其漏电感参数越小的,更有利于在短时间内将能量反馈到储能介质中。

综上所述,不同类型的电驱系统的能量回收工作范围是不一样的。高性能电驱系统能量回收工况的运行范围大于普通电驱系统。而低速度工况下的滑行在城市运行路况中非常常见,高性能的电驱系统能够在城市路况中回收更多的能量。电驱系统的检测标准需要认真考量实现能量回收试验的速度的范围。

4.3 循环工况测试

对于整车短距离电驱、长距离电驱和城市电驱 3 个节能技术检测试验,一般采用循环工况法进行评价<sup>[7-9]</sup>。在零部件阶段对动力系统中电池和电驱部分也可以采用相似的检测手段,比如关于动力电池检测就在标准 ISO 12405-2 规定了几种循环工况法。针对电驱系统循环工况的检测方法目前还在研究过程中,但循环工况法相比静态工作点测试方法能够更准确地评价车用电驱系统的能耗情况。

对于纯电动汽车、增程式电动汽车和燃料电池汽车的电驱系统,电机负载转矩就等效于车辆行驶的所需动力。而混动汽车中,电机负载转矩要考虑发动机输出转矩的关系。设计混动汽车电驱系统循环工况试验需要考虑发动机的影响,可以采用车载数据采集设备记录混动汽车在实际行驶过程中其电驱系统的转速

和转矩数据,结合这类数据设计电驱系统台架测试中的循环工况试验方法。

## 5 检测案例

本研究采用如图2所示的电机及控制器测试台架,其实物图如图6所示。其中被测试电机为调速永磁同步电机,电机额定功率为90 kW,额定电压为220 V,输入直流电压范围在280 V~380 V;电机控制器输出额定电压250 V,额定功率150 kW。



图6 测试台架试验实物图

本研究通过测试台架测定电驱系统在不同转距和转速条件下的整体效率,绘制效率分布图。将电动运行和发电运行效率图合并在图5中,将图5与图4比较可以测定每一种工况下电驱系统的典型效率值(效率值列举在图5中)。

由图5可以全面分析电驱系统在各个工况下的效率情况,其中该控制器在电机4 000 r/min和转矩50 N~100 N的条件下可以获得最佳工作效率94%,而低速启动状态下的效率情况还需要改善。在电机转速低于1 000 r/min而转矩大于100 Nm的条件下,整个电驱系统的机电能量转换效率小于80%。而相同的转速条件下,当转矩提高到150 Nm时,系统的效率小于70%。相同转速下,继续增大转矩那么系统的效率会下降到50%以下。

## 5 结束语

本研究从新能源汽车能耗的角度出发,分析了不

同种类新能源汽车能耗检测标准的异同,提出了电驱系统在整车能耗检测中的重要性。根据电驱系统的输入输出结构,设计了基本测试台架方案。介绍了不同种类新能源汽车节能技术的异同,分析了电驱系统电路结构和损耗来源。从新能源汽车整车节能工况的角度出发,分析了电驱系统在不同工况条件下的能量转换效率,分别阐述电驱系统不同性能参数与整车工况能耗之间关系。结合实际检测案例,分析了具体电驱系统在不同工况条件的能量转换效率。本研究的研究成果对相关单位和企业做好新能源汽车零部件检测工作具有一定参考意义。

## 参考文献(References):

- [1] 王兆,袁建军. 美国基于汽油的电动汽车燃料经济性评价方案介绍[J]. 北京汽车,2012(1):37-41.
- [2] 杜发荣,姬芬竹. 电动汽车动力传动系统评价体系参数[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2008,27(2):272-275.
- [3] 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):44-48.
- [4] 张炳力,徐小东. 混合动力汽车动力系统测试平台的研究[J]. 农业装备与车辆工程,2008,46(11):24-27.
- [5] 倪光正. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- [6] 初亮,蔡健伟,富子丞等. 纯电动汽车制动能量回收评价与试验方法研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2014,42(1):18-22.
- [7] 李孟良,彭文明,颜伏伍等. Plug-in 混合动力电动汽车能耗综合评价方法研究[J]. 汽车工程,2014,36(8):919-922.
- [8] 陈舒燕,朱靖,余朝刚. 具有能量回馈的纯电动车驱动控制系统[J]. 轻工机械,2015,33(3):54-57.
- [9] 王计广,李孟良,徐月云,等. 电动汽车制动能量回收系统评价方法研究[J]. 汽车技术,2014,45(12):35-39.

[编辑:张豪]

## 本文引用格式:

谢秋慧,张昊,童琛,等. 新能源汽车电驱动系统能耗检测方法及评价体系研究[J]. 机电工程,2016,33(4):464-469.

XIE Qiu-hui, ZHANG Hao, TONG Zhen, et al. Testing method and evaluation system for energy consumption of motor drive system in newenergy vehicles[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(4):464-469.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>