# 滑行过程中的电机控制对电动汽车行驶阻力的影响分析

# 龚来智, 雷 志, 罗 玮, 陈文敏

(奇瑞汽车股份有限公司 节能环保性能开发部,安徽,芜湖 241000)

摘 要:针对某款纯电动轿车进行整车阻力试验分析与研究,在整车阻力分解阶段提出在原有电机控制策略的基础上进行"电机零转矩指令下偏正向转矩标定优化"的控制策略,并对体现优化策略的实车进行阻力复测研究。研究结果表明,优化后的策略对降低整车行驶阻力有明显的改善,整车道路行驶阻力平均值降低 33 N。运用此策略在进行道路行驶阻力测试时满足相应的国标测试规范,对新标欧洲循环测试(New European Driving Cycle, NEDC)下的续驶里程提升也有显著贡献。

关键词: 纯电动汽车; 电机控制策略; 行驶阻力; 新标欧洲循环测试; 续驶里程

中图分类号: U467.1+1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2019.02.05

# The Impact Analysis of Driving Resistance for Electric Vehicles Based on Motor Control in the Coast down Test

GONG Laizhi, LEI Zhi, LUO Wei, CHEN Wenmin

(Energy & Environment Protection Performance Development Department, CHERY Automobile Co., Ltd, Wuhu 241000, Anhui, China)

**Abstract:** The resistance of a pure electric vehicle was measured and analyzed. In the stage of resistance decomposition, an optimization strategy for the zero torque request of the motor was put forward based on the original strategy. Then, the new strategy was implemented in the resistance test. The results show that the optimized strategy leads to an obvious improvement in driving resistance. The average driving resistance was reduced by 33 N. This strategy conforms to the national standard specifications of the road driving resistance test, and also contributes significantly to the increase in driving range under NEDC.

**Keywords:** pure electric vehicle; motor control strategy; driving resistance; new European driving cycle; driving range

近年来,随着全球能源的不断短缺,温室效应 的不断加剧,以石油、天然气为主要能源支柱的交 通领域和汽车行业面临着巨大的变革压力,各国政 府和汽车巨头都不惜重金研究新能源汽车,并出台 了相应的发展政策、规划等<sup>[1-2]</sup>。纯电动汽车具有 节能、零排放、低噪声等优点,成为了各国发展绿 色汽车的重要方向。

纯电动汽车续驶里程作为衡量电动汽车经济性

收稿日期: 2018-03-16 改稿日期: 2018-04-12

基金项目: 国家科技支撑计划重大项目"下一代低能耗纯电动轿车平台及整车技术开发"(2015BAG17B00)

参考文献引用格式:

囊来智, 雷志, 罗玮, 等. 滑行过程中的电机控制对电动汽车行驶阻力的影响分析 [J]. 汽车工程学报, 2019, 9(2): 109-114. GONG Laizhi, LEI Zhi, LUO Wei, et al. The Impact Analysis of Driving Resistance for Electric Vehicles Based on Motor Control in the Coast down Test [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(2): 109-114. (in Chinese)

的核心指标,更是吸引用户购买电动汽车的条件之一。提升纯电动汽车续驶里程不仅是为了满足客户需求和节能要求,更是汽车企业可持续发展的必经之路<sup>[3]</sup>。当前,我国针对新能源汽车出台了各种政策、法规和要求,无形中也给企业带来了一定的压力。提升电动汽车续驶里程成为各大主机厂发展电动汽车的头等大事。本文旨在通过对核心部件电驱动系统的控制策略优化,降低整车行驶阻力,提升整车纯电续驶里程。

## 1 整车道路行驶阻力测试规范

依据 GB 18352.5—2013《轻型汽车污染物排放 限值及测量方法 - 中国第五阶段》<sup>[4]</sup> 以及新发布的 GB 18386—2017《电动汽车能量消耗率和续驶里程 试验方法》,电动汽车必须在底盘测功机上模拟汽 车道路载荷。而道路载荷必须通过对汽车道路行驶 阻力进行测定,确定其大小<sup>[5]</sup>。本次利用滑行法测 定的汽车道路行驶阻力,其测量原理,以及利用该 原理对汽车行驶阻力进行校核的过程,包括对环境 条件的控制、测量仪器的精度要求、测量数据处理 等均符合国家标准和法规的要求。

## 2 纯电动汽车整车阻力分解

2.1 道路行驶阻力测试原理<sup>[6]</sup>

汽车在水平道路上行驶时其动力平衡方程式为:

$$F_{t} = F_{f} + F_{w} + F_{i} \, . \tag{1}$$

式中:  $F_t$ 汽车驱动力, N;  $F_f$ 汽车滚动阻力, N;  $F_w$ 汽车空气阻力, N;  $F_i$ 汽车加速阻力, N。

根据汽车理论可知,当汽车处于滑行行驶状态 下,其动力方程式为:

$$0 = F_{\rm f} + F_{\rm w} + F_{\rm j} \, \circ \tag{2}$$

即:

$$-F_{j} = F_{f} + F_{w} = -(m + m_{r})\frac{dv}{dt} = -(m + m_{r})\lim_{\Delta v \to 0} \frac{dv}{dt} \circ (3)$$

式中: *m* 为汽车整备质量, kg; *m*<sub>r</sub> 为整车转动惯量 引起的当量质量, kg。

因此,当能够测出汽车在水平路面上滑行行驶的减速度,就可测定汽车行驶时来自地面的滚动阻力

 $F_{\rm f}$ 与空气阻力 $F_{\rm w}$ 之和,取 $\Delta V = 5$  km/h可近似认为:

$$\lim_{\Delta \nu \to 0} \frac{\Delta \nu}{\Delta t} \approx \frac{\Delta \nu}{\Delta t} \circ$$
(4)

综上所述,滑行过程中的行驶阻力测定即可 按照单位车速之间的时间差进行测定,单位车速取 5 km/h,车速及时间测试设备为 GPS 车速仪。

#### 2.2 机械阻力分解

以某前驱纯电动轿车前后轴的 CATIA 数模为 例(图1),整车的机械阻力可分为前轴机械阻力 和后轴机械阻力。前轴机械阻力可分解为轮胎、制 动系统、轴承系统、传动轴、主减速器、电机阻力等, 而后轴的机械阻力可分解为轮胎、制动系统及轴承 系统阻力。上述部件构成整车机械部分阻力贡献, 从整车阻力分解角度出发,这些系统零部件阻力分 解要求均属于整车阻力控制范畴。本次仅探讨电机 阻力对整车阻力的影响。



(a) 前轴 CATIA 数模



(b) 后轴 CATIA 数模

图 1 某前驱纯电动轿车前后轴简化数模图

## 3 优化电机控制策略

#### 3.1 结构局限

根据电机的调速区间,目前大多数纯电动汽车 只匹配单极速比减速器即可满足较宽的车速调速范 围,但在结构上,所谓的电动汽车挂"空挡"并不 能像传统汽油车匹配的变速器,如 MT/CVT/DCT 等实现对整车动力传输路径的断开,对于这种电动 汽车所谓的"空挡"只是对电机请求置于"零位", 其传动系机械联接仍然存在。因此,在电机"零位" 状态下的电机控制就会对整车空挡状态下的滑行阻 力测试产生较大的影响。以某车型为例,整车主减 速比7.28,轮胎型号205/55 R16,若在电机"零转矩" 指令下的某个转速点产生-0.5~0 Nm的转矩波动, 那么通过速比的放大,整车在该转速下的车速点阻 力增大约0~12 N。

#### 3.2 优化策略

基于上述局限,提出了一种"电机零转矩指令 下偏正向转矩优化"的控制策略。电机转矩的控制精 度由于相电流的零飘和工作电压的跃变,导致输出转 矩不稳定。虽然整体进行了转矩滤波,但还是会出现 电机转矩正负跳动的现象。因此,本文提出的优化 策略是通过主动识别电机负向转矩,主动补偿相电 流,使"零转矩"指令下的电机转矩偏正向转矩优 化,避免了上述电机正负转矩跃变引起的行驶阻力 突变和阻力曲线失真等不满足国标测试精度的问题。

#### 4 电机标定与实车阻力测试分析

基于优化后的电机"零转矩"控制策略,分别 通过对电机台架标定与整车阻力测试研究该优化策 略对整车阻力的影响,并将分析结果与优化后的实 测整车阻力曲线相结合输入到 Cruise 软件中进行仿 真,评估分析该策略对 NEDC 循环工况下的续驶里 程贡献。

### 4.1 电机台架标定

采用两台电机,其参数见表1,搭建了对拖试

表1 PMSM 电机参数

参数	值
额定功率 $P_1/kW$	45
峰值功率 $P_2/kW$	90
额定转速 $n_1/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	3 200
峰值转速 $n_2/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	12 000
极对数	3



图 2 电机试验对拖台架

验台架(图2)。台架试验中采用的转矩传感器型 号为德国 HBM TB1A 500,测量精度可达 0.1%,额 定转速为 15 000 r/min。为了避免传感器变形而产生 的附加弯矩,安装时必须使被测电机、传感器、对 拖电机三者具有较好的同轴度,同时两个半联轴器 间应留有一定的间距<sup>[5]</sup>。

## 4.2 电机台架数据分析

通过对对拖电机转速、转矩施加控制实现对被 测电机的测试是常见的电机台架测试手段<sup>[7]</sup>。转矩 传感器与功率分析仪之间采用电气连接,通过测试 被测电机所反馈的转速、转矩信息,即可得到被测 电机零转矩指令下所反馈的转矩值,以此为依据, 对电机负向转矩进行补偿优化,通过对优化后的电 机转矩值进行测试发现,该优化策略实现了预期效 果。优化前后电机零转矩指令下所反馈的转矩值对 比如图 3 所示。



#### 图 3 优化前后电机零转矩指令下所反馈的转矩值对比

对比分析发现,所提出的"电机零转矩指令下 偏正向转矩优化"控制策略能够实现电机在不同转 速下电机转矩为正值输出,且维持一定的稳定性。

## 4.3 整车机械阻力测试<sup>[8]</sup>

对优化前后的整车进行不同车速下的前后轴机 械阻力测试,测试工况分为整车上电和整车下电两 种测试工况。测试设备为底盘测功机,整车刚性水 平固定在底盘测功机上,通过 AVL 转毂软件的设定 实现不同车速下前后轴的阻力测试。

## 4.4 整车机械阻力数据对比分析

分别测试优化前后整车上电状态下的前后轴机 械阻力和整车下电状态的机械阻力,试验测试结果 见表 2、表 3 和表 4,阻力对比图如图 4 所示。

表 2 整车下电状态下的前后轴阻力测试结果

车速 v/(km・h <sup>-1</sup> )	前轴阻力 $F_{2f}/N$	后轴阻力 $F_{2r}/N$	总阻力 F <sub>2T</sub> /N
120.0	176.6	91.1	267.7
110.0	165.9	87.6	253.5
100.0	158.2	85.7	243.9
90.0	151.8	82.7	234.5
80.0	144.5	81.0	225.5
70.0	138.2	80.6	218.8
60.0	131.9	79.6	211.5
50.0	126.5	77.2	203.7
40.0	119.8	75.9	195.7
30.0	114.0	73.9	187.9
20.0	106.0	71.7	177.7
10.0	97.3	69.2	166.5

	表 3	整车上电状态下的前后轴阻力测试组	宇
--	-----	------------------	---

车速 v/(km・h <sup>-1</sup> )	前轴阻力 $F_{2f}/N$	后轴阻力 $F_{2r}/N$	总阻力 F <sub>2T</sub> /N
120.0	195.3	92.6	287.9
110.0	196.7	87.2	283.9
100.0	112.3	85.3	197.6
90.0	98.6	82.7	181.3
80.0	86.1	80.4	166.5
70.0	75.2	79.7	154.9
60.0	69.3	78.6	147.9
50.0	67.7	76.8	144.5
40.0	71.3	75.5	146.8
30.0	117.0	73.8	190.8
20.0	110.4	71.7	182.1
10.0	103.7	68.7	172.4

#### 表 4 体现优化策略后的前后轴阻力测试结果

车速 $v/(\mathbf{km} \cdot \mathbf{h}^{-1})$	前轴阻力 $F_{2f}/N$	后轴阻力 F <sub>2r</sub> /N	总阻力 F <sub>2T</sub> /N
120.0	119.5	93.7	213.2
110.0	110.3	88.6	198.9
100.0	109.1	86.1	195.2
90.0	105.2	82.8	188
80.0	104.3	80.1	184.4
70.0	100.9	79.5	180.4
60.0	96.4	78.4	174.8
50.0	93.3	77.0	170.3
40.0	91.0	76.2	167.2
30.0	88.9	74.7	163.6
20.0	85.7	72.0	157.7
10.0	80.3	69.0	149.3



#### 图 4 不同工况下的阻力测试结果对比图

从不同工况下的整车机械阻力测试结果来看, 后轴阻力较为稳定,数据一致性较好。而前轴上电 与下电状态下所测得的阻力存在较大差异,优化后 的前轴阻力平顺性更好,无突变现象,且通过优化 后的前轴阻力均小于下电状态。从数据上看,120-10 km/h 前轴平均阻力降低 36 N。

综上所述,本研究针对电机零转矩指令下的转 矩控制优化对降低整车机械阻力有明显的作用,理 论上对整车道路行驶滑行阻力曲线也有相同的阻力 贡献。为验证虚实,按照 GB 18352.5—2013 标准进 行道路行驶阻力测试,测试结果显示优化前后该车 型 120-5 km/h 道路行驶阻力平均值降低约 33 N(由 于道路阻力测试受环境因素影响,与台架试验结果 存在一定误差,实测阻力偏差 3 Nm,为可接受范围), 道路行驶阻力曲线测试结果对比如图 5 所示。



图 5 该车型基准质量下的行驶阻力测试结果对比

# 5 针对续驶里程 CAE 评估影响分析

将该车型优化前后所测得的道路行驶阻力曲线 输入 Cruise 软件,进行整车 NEDC 续驶里程仿真分 析,整车参数输入见表 5。

参数	值
整备质量 m/kg	1 550
轮胎有效滚动半径 r/mm	307
轴距 /mm	2 650
SOC 放电深度 /%	90
电池额定电压 U/V	350.4
风阻系数 CD	0.34
迎风面积A/m²	2.3
主减速比	8.28
电池容量 C/Ah	72
电池总能量 $Q/kWh$	49

表 5 某电动汽车整车参数

根据输入的整车参数与边界,在 Cruise 软件中 搭建 CAE 动力学仿真模型(图 6a)及过程数据分 析(图 6b 和 6c)。分别将优化前后的整车阻力曲



(a) CAE 动力学仿真模型





图 6 CAE 动力学仿真模型及过程数据分析

线作为整车仿真边界进行 NEDC 工况法的续驶里程 仿真,并结合整车续驶里程与整车平均阻力的灵敏 度分析,最终评估优化后的整车 NEDC 工况下的续 驶里程提升约 15 km。

优化前后的整车仿真边界与 NEDC 续驶里程仿 真结果对比见表 6。

表6	整车输入边界与 NEDC 续驶里程仿真结果
----	-----------------------

输入边界	优化前	优化后
整备质量 m/kg	1 550	1 550
行驶阻力曲线 /N	$F = 0.045V^2 -$	$F = 0.042  6V^2 -$
	0.424V+194.85	0.4568V+170.11
SOC 放电范围	$100\% \sim 10\%$	$100\% \sim 10\%$
能量回收率 /%	15	15
电池能量 Q/kWh	49	49
NEDC 续驶里程 /km	322.7	337.3

# 6 结论

针对某纯电动轿车,在开展整车阻力测试及阻 力分解研究的过程中,提出了在原有电机控制策略 的基础上实行"电机零转矩指令下偏正向转矩优化" 的控制策略。该策略实施后在降低该车型的整车行 驶阻力方面产生了较为明显的效果,在满足国标测 试标准的情况下,测试结果显示优化后的整车平均 行驶阻力降低 33 N。

基于 Cruise 软件对该车型进行动力学 CAE 仿 真分析,分别输入优化前后的阻力曲线作为整车的 仿真边界,其它边界条件不变,仿真结果显示该车

#### 参考文献(References)

- 周飞鲲. 纯电动汽车动力系统参数匹配及整车控制策略研究 [D]. 长春:吉林大学, 2013.
   ZHOU Feikun. Research on Powertrain Parameters Design and Vehicle Control Strategy for Pure Electric Vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
   [2] 王佳. 纯电动汽车能量管理关键技术及高压安全策略研
- [2] 土住. 纯电动汽车能重官理关键投水及商压安至束略研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
   WANG Jia. Research on Key Technologies of Energy Management System and High Voltage Safety Strategy of the Pure Electric Vehicles [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [3] 周华伟. 永磁同步电机控制在电动汽车中的应用 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.

ZHOU Huawei. Research on Control Methods of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives for Electric Vehicle Applications [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)

[4] GB 18352.5—2013. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)[S].北京:中国环境出版社,2013.
 GB 18352.5—2013. Limits and Measurement Methods for Emissions From Light-Duty Vehicles (CHINA 5) [S].

型在 NEDC 工况下的纯电续驶里程提升约 15 km。

综上所述,电机零转矩指令下的转矩控制优化 对整车空挡滑行过程中的阻力产生了较大影响,同 时对电机在空挡滑行过程中,即在零转矩指令下施 加偏正向转矩优化的策略可降低整车行驶阻力。该 策略在其它车型上的应用在此不作详细说明。

Beijing: China Environment Publishing Group, 2013. (in Chinese)

- [5] 张重文. 汽车道路行驶阻力测量原理及测量方法 [J]. 广东公路交通, 1998, 52(1): 220-224.
  ZHANG Chongwen. The Measuring Principles and Methods of Vehicle Road Resistance [J]. Guangdong Highway Communications, 1998, 52(1): 220-224. (in Chinese)
- [6] 余志生. 汽车理论 [M]. 第5版. 北京: 机械工业出版社, 2009: 2-30.
  YU Zhisheng. Automotive Theory [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2009: 2-30. (in Chinese)
- [7] 强雄,严蓓兰,钱奇文.HBM 扭矩传感器在电机测试中的应用 [J].电机与控制应用,2007,34(1):49-51.
  QIANG Xiong, YAN Beilan, QIAN Qiwen. Application of HBM Torque Sensor at Motor Test [J]. Motor and Control Applications, 2007, 34(1):49-51.(in Chinese)
- [8] 龙金世.一种应用于整车行驶机械阻力的测试方法:中国, CN201510273949.3 [P]. 2015-09-02.
   LONG Jinshi. The Test Method Applied in the Vehicle Driving Mechanical Resistance: China, CN201510273949.3
   [P]. 2015-09-02. (in Chinese)

#### 作者介绍



龚来智(1990-),男,安徽芜湖人。硕士,工程师,主要研究方向为电动汽车整车动力性经济性开发、整车 及控制系统设计、整车能源管理匹配。

Tel: 18755379071 E-mail: autsglz@126.com