电动汽车低温轮胎滚动阻力特性与整车能耗仿真及测试分析

伍魏明[1] 刘臻[2] 陈真[2] 吴昌圣[2] 吕华伟[1]

（1.蔚来汽车科技（安徽）有限公司，合肥 230601；2.上海蔚来汽车有限公司，上海 201800）

【摘要】为研究低温环境轮胎滚动阻力特性对电动汽车驱动能耗的影响，对20款轮胎样本开展了低温和常温条件下的滚动阻力测试，分析了低温滚动阻力系数的增幅，在低温环境下，轮胎滚动阻力系数呈明显升高趋势。以某纯电动SUV车型为研究对象，通过轮胎滚动阻力测试数据开展低温滚动阻力对车辆行驶阻力的影响分析，基于AVL Cruise软件建立中国轻型汽车测试循环-乘用车（CLTC-P）工况整车能耗仿真模型，通过仿真分析低温轮胎滚动阻力对低温、常温驱动能耗的影响，并开展该车型的整车低温、常温转鼓驱动能耗测试，完成测试能耗和仿真能耗对比验证。结果表明：低温环境下整车总体百公里驱动能耗增加4 kW·h，低温轮胎滚动阻力上升使百公里驱动能耗增加2.3 kW·h。

关键词：轮胎 滚动阻力 低温 CLTC-P

中图分类号：U469.72 **文献标志码：**A **DOI：**10.20104/j.cnki.1674-6546.20240402

Analysis and Simulation of the Rolling Resistance Characteristics and Energy Consumption of Low-Temperature Tires for Electric Vehicles

Wu Weiming[1], Liu Zhen[2], Chen Zhen[2], Wu Changsheng[2], Lü Huawei[1]

(1. NIO Technology (Anhui) Co., Ltd., Hefei 230601; 2. NIO Co., Ltd., Shanghai 201800)

【**Abstract**】The rolling resistance test at low temperature and normal temperature is conducted with 20 tire samples. This article analyzes the increase amplitude of low temperature rolling resistance coefficient, and it is shown that tire rolling resistance coefficient shows a remarkable increase trend at low temperature environment. The article takes a battery electric SUV as the research objective to analyze the impact of low-temperature rolling resistance on vehicle driving resistance through tire RR test data. A China Light duty vehicle Test Cycle-Passenger (CLTC-P) energy consumption simulation model is established based on AVL Cruise software to analyze the impact of low-temperature tire rolling resistance on drive energy consumption through simulation. Low-temperature and normal temperature energy consumption test of this SUV is conducted, comparison and verification of test energy consumption and simulation energy consumption are completed. The results indicate that vehicle 100 km drive energy consumption in low temperature environment increases by 4 kW·h, the rise of low temperature tire roll resistance increases 100 km drive energy consumption by 2.3 kW·h.

Key words: Tires, Rolling resistance, Low temperature, China Light duty vehicle Test Cycle-Passenger (CLTC-P)

【引用格式】伍魏明, 刘臻, 陈真, 等. 电动汽车低温轮胎滚动阻力特性与整车能耗仿真及测试分析[J]. 汽车工程师, 2026(3): 43-48.

WU W M, LIU Z, CHEN Z, et al. Analysis and Simulation of the Rolling Resistance Characteristics and Energy Consumption of Low-Temperature Tires for Electric Vehicles[J]. Automotive Engineer, 2026(3): 43-48.

1 前言

电动汽车的整车能耗和续驶里程是用户关注的重要指标。国内外学者针对电动汽车的能耗开展了大量研究。Mruzek[1]等基于MATLAB软件仿真分析了整车能耗的因素影响，发现整车质量对能耗的影响显著。王福坚[2]等开展中国轻型汽车测试循环-乘用车（China Light-duty Vehicle Test Cycle - Passenger，CLTC-P）工况下的低温整车能量流动分析，研究了热管理系统优化策略对低温续驶里程和

能耗的影响。姜宏霞[3]等开展纯电动汽车的能耗优化研究，仿真分析了不同轮胎滚动阻力下的整车常温能耗，指出低滚动阻力轮胎技术是能耗优化的重要路径。研究表明，轮胎滚动阻力对电动汽车的能耗和续驶里程有重要影响[4]。

现有研究多基于常温环境或整车热管理开展低温环境下的整车能耗分析[5]，温度对轮胎滚动阻力（Rolling Resistance，RR）的影响分析及不同温度环境下轮胎滚动阻力变化对整车能耗的影响研究较少。轮胎滚动时的滞后损失及其与路面摩擦产生的损耗形成了轮胎的滚动阻力，滚动阻力与温度密切关联，受橡胶材料特性影响，当轮胎处于低温环境时，其滚动阻力呈增加趋势。轮胎的滚动阻力系数（Rolling Resistance Coefficient，RRC）可以通过滚动阻力和轮胎负荷计算获得。轮胎滚动阻力的影响因素较多，包括胎压、轮荷、路面的刚度和表面平整度、环境温度、轮胎温度、空气阻力等，故搭建轮胎滚动阻力仿真模型难度较高[6]。

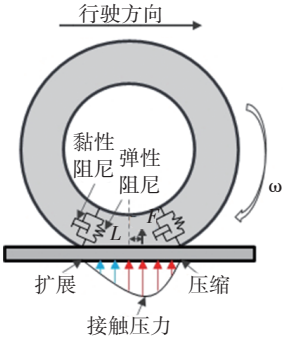
本文以电动汽车驱动轮的轮胎作为测试对象，开展常温、低温环境下轮胎滚动阻力测试，获得多款轮胎的低温滚动阻力变化数据，基于某型号电动汽车开展常温、低温环境下的CLTC-P工况能耗仿真和测试，并分析低温场景下轮胎滚动阻力的变化及其对整车能耗的影响。

2 轮胎滚动阻力机理与测试方法

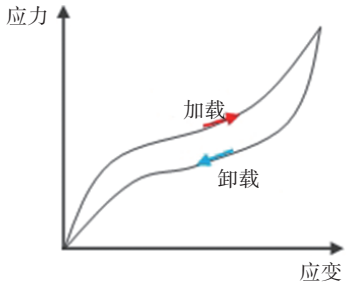
2.1 轮胎变形和滚动阻力机理

车辆行驶过程中，轮胎胎面与地面直接接触，轮胎与路面间相互作用，产生摩擦和变形损耗，轮胎和轮辋的接触面存在变形，同时，轮胎内部的帘线、钢丝、橡胶相互作用，存在内部变形[7-8]。

橡胶材料存在迟滞特性，主要表现为加载及卸载时的迟滞效应，轮胎接触路面变形产生滚动阻力，如图1所示。



（a）滚动变形



（b）迟滞特性

图1 轮胎滚动变形和迟滞特性

在轮胎滚动过程中，橡胶与地面接触处呈压缩状态，在离开地面处呈现扩展状态。橡胶的迟滞特性使轮胎受到的力非对称分布，在与轮轴距离为L处形成合力F，阻碍轮胎滚动，见图1。该合力对整车的作用表现为阻力力矩M：

$$M=FL \tag{1}$$

2.2 轮胎滚动阻力测试方法

2.2.1 测试原理

基于环境舱内的转鼓式测试平台进行轮胎滚动阻力测试，测试原理如图2所示。将被测轮胎置于转鼓上并对轮胎施加径向负载，开展常温和低温滚动阻力测试，记录测试过程中轮胎对转鼓的作用扭矩，取扭矩稳定后的平均值，计算轮胎的滚动阻力和滚动阻力系数。

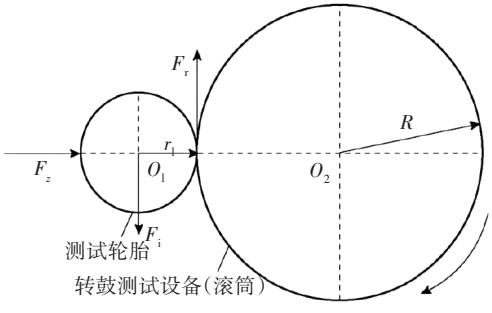


图2 轮胎滚动阻力测试设备原理

滚动阻力系数的计算公式为：

$$C_{RRC}=F_r/F_z \tag{2}$$

式中：C_{RRC}为轮胎滚动阻力系数；F_r为轮胎滚动阻力，通过测试获得；F_z为轮胎垂直负荷。

根据平衡原理可得F_r：

$$F_r=T_t/R-F_{pl} \tag{3}$$

式中：T_t为轮胎对转鼓产生的扭矩，R为转鼓的半径，F_{pl}为转鼓的寄生阻力。

在轮胎滚动阻力系数达到稳定负荷状态后，施加<200 N的径向负荷，测得此时轮胎对转鼓产生的扭矩T_{tp}。寄生阻力F_{pl}的计算公式为：

$$F_{pl}=T_{tp}/R \tag{4}$$

2.2.2　测试影响因素

轮胎滚动阻力系数受到温度、压力等因素影响[9]，本文基于ISO 28580: 2018开展轮胎闭气试验，分别进行常温（25 ℃）和低温（−7 ℃）环境的轮胎滚动阻力系数测试，记录试验过程中的阻力、温度、胎压等参数，开展整车能耗仿真和测试分析。

2.3　测试分析

测试轮胎样件包括多个制造商、胶料配方和尺寸规格，轮胎尺寸有20英寸、21英寸、22英寸。本文重点研究低温环境相较于常温环境下轮胎滚动阻力系数的变化幅值，定义低温滚动阻力系数的增长幅值为R_{RRCIt}：

$$R_{RRCIt}=C_{RRCIt}/C_{RRCnt} \tag{5}$$

式中：C_{RRCIt}、C_{RRCnt}分别为低温、常温条件下的滚动阻力系数。

测试结果如图3所示。试验温度从25 ℃下降至−7 ℃时，轮胎变形过程的力学损耗增加，轮胎滚动阻力系数呈显著的增加趋势，不同测试样本的变化幅值存在明显差异，不同测试样本的轮胎胶料配方存在差异。

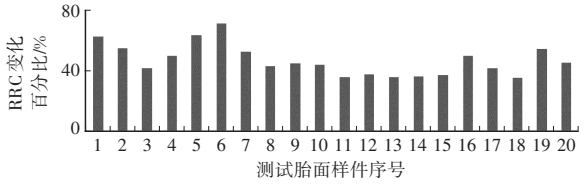


图3　低温滚动阻力系数相对于常温滚动阻力系数的变化幅值

由于低温环境下胎压降低，开展240~290 kPa胎压范围内的滚动阻力系数测试，研究低温场景下胎压变化对轮胎滚动阻力系数的影响。仅改变轮胎初始胎压，速度、载荷、温度不变，测试结果如图4所示。

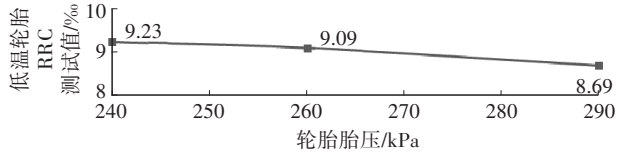


图4　胎压对低温环境下轮胎滚动阻力系数的影响

3　整车架构及能耗仿真分析

对某SUV车型开展能耗分析，整车双电机系统架构如图5所示，在车辆的前、后端各搭载了一套电驱动系统，分别为异步电驱动系统、永磁同步电驱动系统，前、后驱动系统可实现独立扭矩控制。永磁同步电驱动系统为主驱动系统。整车在中、低负载条件下行驶时，永磁同步电驱动系统单独驱动车辆，仅在车辆需求负载较大及高车速驾驶时，异步电驱动系统参与驱动。

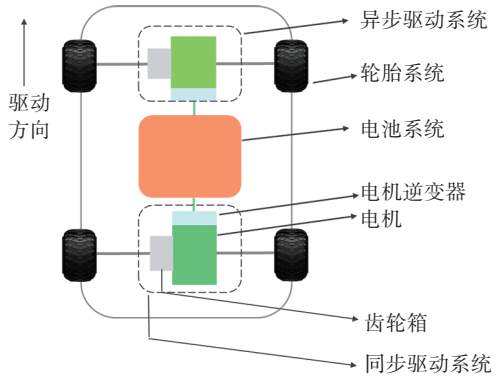


图5　双电机系统架构

整车主要性能参数如表1所示，其中轮胎系统为20号样本。

表1　整车主要性能参数

系统	参数	取值
整车系统	整车质量/kg	2 400
	轴距/mm	2 900
	风阻系数	0.26
	迎风面积/m^2	2.88
底盘系统	底盘拖滞力矩/N·m	10
	轮胎型号	255/50R20
动力系统	电池类型	三元锂电池
	电池容量/kW·h	100
	电机类型	异步电机（前），同步电机（后）
	减速器速比	固定

3.1　模型搭建

采用AVL Cruise软件搭建整车能耗模型，由整车模型、传动系统和轮胎模型、电池模型、前后双电机驱动模型构成，如图6所示。

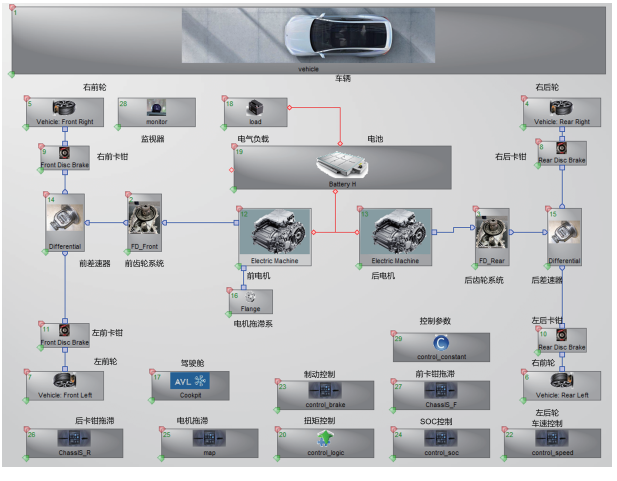


图6　整车能耗仿真分析模型

将电池系统的串并联参数、电压参数和内阻参数输入电池模型，将电机系统的效率特性和转速扭矩特性输入电机模型，基于MATLAB软件编制整车动力系统的控制策略，开展MATLAB和AVL Cruise联合仿真。

3.2 整车行驶阻力分析

电动汽车在平面道路上行驶，忽略道路坡度对车辆阻力的影响，整车匀速行驶阻力主要包括滚动阻力$F_{rolling}$、空气阻力F_{aero}和底盘拖滞阻力F_{mech}[10]：

$$F_{rolling}=mgC_{RRC} \tag{6}$$

$$F_{aero}=0.5\rho AC_d v^2 \tag{7}$$

$$F_{mech}=4(T_{bearing}+T_{calliper})/r_t \tag{8}$$

式中：m为整车质量；g为重力加速度；ρ为空气密度；C_d为整车风阻系数，通过计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）仿真或整车风洞测试获得；A为车辆的迎风面积；v为车辆行驶速度；$T_{bearing}$为单个轮毂轴承的拖滞力矩；$T_{calliper}$为单个制动钳的拖滞力矩；r_t为轮胎的转动半径。

整车匀速行驶时的总阻力F_{total}为$F_{rolling}$、F_{aero}、F_{mech}之和，不同车速下的整车阻力如图7所示。

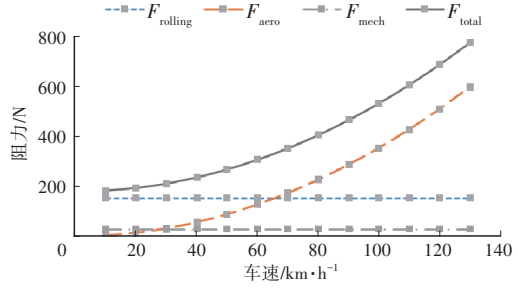


图7 整车行驶阻力曲线

当车速低于60 km/h时，整车行驶阻力主要受轮胎滚动阻力的影响；当车速为30 km/h时，整车的轮胎滚动阻力占整车行驶阻力的70%以上。

当车速高于60 km/h时，空气阻力是整车行驶阻力的主要影响部分，当车速为120 km/h时，空气阻力占整车行驶阻力的70%以上。

3.3 轮胎滚动阻力系数对整车阻力的影响分析

基于第2节获得的轮胎滚动阻力系数测试结果，结合整车质量可计算出不同温度下的整车轮胎滚动阻力。以常温25 ℃条件下的滚动阻力为基准值，分析低温环境下整车轮胎滚动阻力的变化情况，基于20号测试样本，低温滚动阻力系数测试结果增大3‰，根据式（6）得到低温环境滚动阻力增大71 N。不同车速下轮胎滚动阻力变化值对整车总阻力的影响如表2所示。低温环境下轮胎滚动阻力系数增大，轮胎滚动阻力的变化对整车总阻力影响显著，当车速为30~120 km/h时，低温环境下整车阻力增加带来的低温轮胎滚动阻力的增加对不同车速整车阻力的影响为10%~34%，对低车速条件下整车阻力的影响尤为明显。

表2 低温环境下轮胎的滚动阻力分析

常温滚动阻力/N	低温滚动阻力/N	低温滚动阻力与整车阻力的比值/%			
		30 km/h	60 km/h	90 km/h	120 km/h
153	224	+34	+23	+15	+10

3.4 CLTC-P能耗分析

CLTC-P测试工况包括环境温度为23 ℃±5 ℃的常温CLTC-P测试和环境温度为-7 ℃±3 ℃的低温CLTC-P测试。CLTC-P测试工况的平均车速为28.96 km/h，低速场景占比大，本文开展低温环境下轮胎对CLTC-P测试工况的能耗影响分析。

根据轮胎在常温和低温环境下的滚动阻力系数测试数据，获得低温环境下轮胎对整车阻力曲线的影响情况，每个速度点的阻力增加量为71 N，如图8所示。

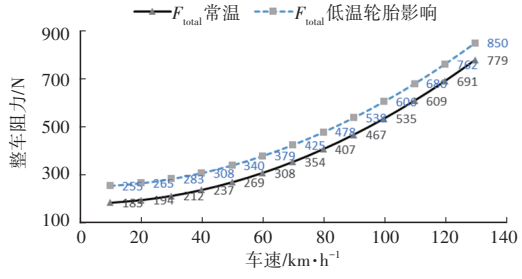


图8 低温环境下轮胎对整车阻力曲线的影响

分别将常温和低温整车阻力参数输入AVL Cruise整车能耗分析模型，保持其他仿真边界不变，可得到常温、低温环境下的CLTC-P工况能耗，与常温（25 ℃）CLTC-P工况能耗相比，低温环境下轮胎滚动阻力增大导致百公里能耗增加2.3 kW·h。

根据GB/T 18386.1—2021《电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法 第1部分：轻型汽车》，低温条件下台架试验滑行阻力为常温条件下台架试验拟合值的1.1倍。通过AVL Cruise仿真可得，整车阻力增加10%，百公里能耗提升1.0 kW·h。

根据实车测试数据，车辆在低温环境下进行CLTC-P工况测试时，胎压降低约30 kPa，根据图4可知，胎压降低造成滚动阻力系数增大4%，通过AVL Cruise仿真得到对整车百公里驱动能耗的影响为0.2 kW·h。

根据电驱动系统在常温和低温环境下的效率

测试结果和AVL Cruise仿真分析可知，低温环境中电驱动系统效率降低，对整车百公里驱动能耗的影响为0.6 kW·h。表3所示为常温和低温环境下的整车驱动能耗仿真分析结果，低温环境下整车百公里驱动能耗增加4.1 kW·h。

表3　整车低温百公里能耗仿真结果　kW·h

影响因素	能耗
整车驱动能耗（常温）	13.4
低温台架拟合阻力影响	1.0
低温轮胎温度和滚动阻力系数影响	2.3
低温轮胎气压和滚动阻力系数影响	0.2
低温电驱动系统效率影响	0.6
整车驱动能耗（低温）	17.5

4　整车能耗测试分析

4.1　整车能耗测试方法

本文测试基于某SUV车型完成，基于CLTC-P工况连续法开展测试，记录车辆在不同温度下每个循环结束后的耗电量及行驶里程，车辆测试状态设置如表4所示。

表4　测试工况与车辆状态设置

测试环境	环境舱参数设置	驾驶模式	空调状态
常温	温度为25 ℃±3 ℃，鼓风机风速随车速	节能	关闭
低温	温度为-7 ℃±3 ℃，鼓风机风速随车速	节能	空调制暖，温度设置为22 ℃自动

测试设备主要包括1台8通道Hioki功率分析仪、多个钳式电流传感器、电驱系统油温传感器以及CANoe设备等。

测试前需在底盘测功机上拟合整车道路的行驶阻力，得到底盘测功机对应的加载系数。依据GB/T 18386.1—2021进行测试，即低温环境整车台架试验拟合阻力为常温环境台架试验拟合值的1.1倍。

4.2　能耗测试结果及分析

基于上述试验方法开展CLTC-P工况的测试，车辆分别在常温和低温环境下连续进行6次CLTC-P工况测试，每个循环的整车驱动能耗测试结果如图9所示。

常温、低温环境试验进行至第3个循环时，整车驱动能耗趋于稳定，此时轮胎系统、电驱动系统趋于稳定。故本文主要对比后4个循环整车驱动能耗的平均值，以获得整车稳定状态下的能耗。常温（25 ℃）环境下的整车百公里驱动能耗为13.6 kW·h；低温（-7 ℃）环境下的整车百公里驱动能耗为17.6 kW·h。

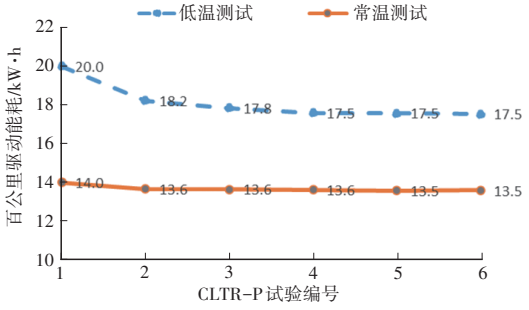


图9　常温、低温环境下驱动能耗测试结果

常温环境下整车能耗仿真结果较测试结果低1.5%，低温环境下整车能耗仿真结果较测试结果低0.6%，仿真与测试结果一致性较好，结果差异主要来自转鼓测试的环境状态、车辆状态和测试操作等。

5　结束语

本文开展了轮胎的滚动阻力系数测试，并针对某SUV车型进行了整车能耗仿真和转鼓能耗测试，得到以下结论：

a. 低温环境下轮胎滚动阻力系数明显增大，20款轮胎样本的低温滚动阻力系数平均增大约50%，高于GB/T 18386.1—2021定义的阻力增加值（10%）。

b. 某SUV车型低温环境下整车驱动阻力增加71 N，中、低速行驶时，整车低温滚动阻力增加值较大，当车速为30 km/h时，低温滚动阻力增加对整车阻力的影响为34%。低温滚动阻力对中、低车速的行驶阻力影响明显。

c. 对某SUV车型驱动能耗的仿真与测试结果一致性较好，低温环境下整车百公里驱动能耗比常温环境下高4.0 kW·h，其中，轮胎滚动阻力的影响为2.3 kW·h，应通过应用低温低滚动阻力轮胎胶料、轮胎气压控制等方法优化低温滚动阻力，以降低整车低温驱动能耗。

参　考　文　献

[1] MRUZEK M, GAJD I, KUERA U, et al. Analysis of Parameters Influencing Electric Vehicle Range[J]. Procedia Engineering, 2016, 134: 165-174.

[2] 王福坚，谢佶宏，邵杰，等. 基于能量流方法的纯电动汽车低温续驶里程提升研究[J]. 汽车工程学报，2024, 14

(3): 531-543.
WANG F J, XIE J H, SHAO J, et al. Research on Improving the Low-Temperature Driving Range of Pure Electric Vehicles Based on the Energy Flow Method[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(3): 531-543.

[3] 姜宏霞，李丹阳，蒋华梁. 基于能量流的纯电动车节能降碳技术研究与应用[J]. 机械研究与应用，2024, 37(4): 109-113.
JIANG H X, LI D Y, JIANG H L. et al. Research and Application of Energy Saving and Carbon Reduction Technology for Pure Electric Vehicles Based on Energy Flow[J]. Mechanical Research & Application, 2024, 37(4): 109-113.

[4] 李博，张朋，徐军辉，等. 纯电动汽车行驶阻力影响因素和高低温阻力修正因子研究[J]. 小型内燃机与车辆技术，2021, 50(4): 63-67+77.
LI B, ZHANG P, XU J H, et al. A Study on the Influence Factors of Driving Resistance and High and Low Temperature Resistance Correction Factors of Electric Vehicles[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technology, 2021, 50(4): 63-67+77.

[5] 刘峁，滕欣余，张国华，等. 基于能量流分析的电动汽车低温能耗研究[J]. 汽车技术，2023(8): 42-47.
LIU J, TEN X Y, ZHANG G H, et al. Research on Low Temperature Energy Consumption of Electric Vehicles Based on Energy Flow Analysis[J]. Automobile Technology, 2023(8): 42-47.

[6] 罗俊. 影响轮胎滚动阻力的因素分析[J]. 自动化仪表，2015, 36(2): 72-75.
LUO J. Analysis on the Factors Affecting Tire Rolling Resistance[J]. Process Automation Instrumentation, 2015, 36(2): 72-75.

[7] 网野直也，张钟和. 轮胎的摩擦与滚动阻力[J]. 轮胎工业，2017, 37(7): 391-394.
AMINO N, ZHANG Z H. Friction and Rolling Resistance of Tires[J]. Tire Industry, 2017, 37(7): 391-394.

[8] 吴桂忠，郑光亮，曲学新. 影响轿车子午线轮胎滚动阻力的因素初探[J]. 轮胎工业，2001, 21(3): 131-134.
WU G Z, ZHENG G L, QU X X. Preliminary Study on Factors Affecting Rolling Resistance of Passenger Car Radial Tires[J]. Tire Industry, 2001, 21(3): 131-134.

[9] 朱成伟，陈强，庄晔，等. 轮毂直驱电动车轮胎刚度及滚阻匹配研究[J]. 机械工程学报，2019, 55(22): 41-51.
ZHU C W, CHEN Q, ZHUANG Y, et al. Research on Tire Stiffness and Rolling Resistance Matching of In-Wheel-Motor Direct Drive Electric Vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(22): 41-51.

[10] 王春生，王学超，孙浩. 新能源汽车续航里程影响因素分析[J]. 汽车工程师，2017(4): 10-42.
WANG C S, WANG X C, SUN H. Analysis on Influence Factors of New Energy Vehicle Cruising Range[J]. Automotive Engineer, 2017(4): 10-42.

（责任编辑　弦　歌）
修改稿收到时间为2025年1月3日。

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊，为RCCSE中国准核心学术期刊、CACJ中国应用型扩展期刊，被哥白尼精选数据库、EBSCO学术数据库、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库、J-Gate数据库收录。

《汽车工程师》以报道汽车产品设计领域的技术研究成果为主，专注于技术开发与应用层面的创新成果，提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势，努力吸收优质稿源，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。重点征稿方向包括：锂离子电池与新体系电池、动力电池热管理与热失控、燃料电池及其关键零部件、车用电机及其控制器、自动驾驶汽车环境感知与感知融合、自动驾驶汽车定位与建图、自动驾驶汽车测试、人工驾驶-无人驾驶车辆混行条件下的自动驾驶控制、智能线控底盘、一体化底盘、功能安全和预期功能安全。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表，我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神，为强大中国汽车工业作贡献！

本刊使用协同采编系统处理稿件，请登陆期刊网站注册后投稿，投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的作者指南，网址：http://tjqc.cbpt.cnki.net。

《汽车工程师》编辑部