湿式双离合变速器在不同坡度起步时滑摩功变化分析*

邱健斌　刁富鑫　郑佳秋　陈铖　王松

（成都工业学院汽车与交通学院，成都 611730）

【欢迎引用】邱健斌，刁富鑫，郑佳秋，等．湿式双离合变速器在不同坡度起步时滑摩功变化分析[J]．汽车文摘，2026(7)：7-12.

【Cite this paper】QIU J B, DIAO F X, ZHENG J Q, et al. Analysis of Sliding Friction Work Changes of Wet Dual Clutch Transmission at Different Slope Starting[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(7): 7-12.

【摘要】为探究湿式双离合变速器（DCT）在不同坡度起步时滑摩功的影响程度，通过数学建模法建立了发动机动态工况、汽车行驶阻力、离合器摩擦副的数学模型以及基于MATLAB/Simulink的汽车传动系统动力模型。分别在0°、10°、20°坡度条件下对湿式DCT起步进行仿真分析，得出不同条件下主、从动端转速变化情况和摩擦副滑摩功的变化情况，从而分析坡度变化对湿式DCT汽车起步的影响，为湿式DCT的理论研究和应用探索提供参考。

关键词：湿式双离合变速器；滑摩功；汽车仿真

中图分类号：U461.4　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240244

Analysis of Sliding Friction Work Changes of Wet Dual Clutch Transmission at Different Slope Starting

Qiu Jianbin, Diao Fuxin, Zheng Jiaqiu, Chen Cheng, Wang Song

（School of Automobile and Transportation, Chengdu Technological University, Chengdu 611730）

【Abstract】In order to explore the influence of wet Dual Clutch Transmission (DCT) on sliding power at different incline starts, the mathematical models of engine dynamic condition, vehicle driving resistance, clutch friction pair and the power model of automobile transmission system based on MATLAB/Simulink are established by mathematical modeling method. The start of wet DCT is simulated under the slope conditions of 0°, 10° and 20° respectively, and the change of the rotating speed of the main and slave ends and the slip and friction work of the friction pair are obtained under different conditions, so as to analyze the influence of slope change on the start of wet DCT vehicles, and provide certain reference and value for the theoretical research and application exploration of wet DCT.

Key words: Wet dual clutch transmission, Sliding friction work, Vehicle simulation

0　引言

随着汽车技术的飞速发展，消费者对汽车的驾乘舒适性和安全性提出了更高要求。汽车起步平稳性作为评价汽车性能和品质的重要指标，不仅影响乘坐舒适度，还涉及车辆长期维护问题。汽车平稳起步不仅可以减少对车辆机械部件的冲击，还可以降低磨损、延长车辆的使用寿命。在相关研究中，白景峰等[1-2]从离合器油液、摩擦片作用等方面对离合器的摩擦特性进行了分析，优化了汽车起步平稳性；周启豪等[3-4]分析了离合器热负荷特性、滑摩功特性对汽车起步工况的影响；Wang等[5]使用参数自适应比例-积分-微分（Proportional Integral Derivative，PID）控制器实现了对离合器压力的精准控制；刘云等[6-7]综合考虑了冲击度和滑摩功对汽车换挡起步的优化策略，提高了变速器的换挡品质。在此基础上，郝洪涛等[8]考虑了有无粘性扭矩对汽车换挡品质的影响；方宏盛[9]通过结合粘性流体力学的层流理论、表面物理化学的杨氏-拉普拉斯方程以及冷却润滑油膜的离心惯性力和表面张力的作用，对油膜与摩擦元件的表面接触模型进行了改进，考虑了离合器进出口油压差以及沟槽的影响，并针对湿式双离合变速器（Dual Clutch

*基金项目：成都工业学院校级项目（2023YB024），成都工业学院校级项目（2023YB026）。

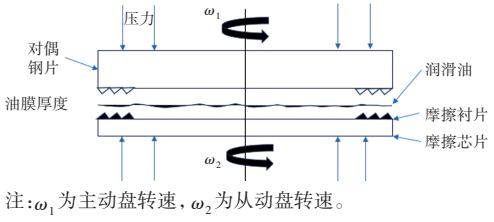
Transmission，DCT）带排扭矩的影响因素进行了深入的敏感度分析；Guo[10]使用MATLAB/Simulink平台建立了双离合起步的模型进行仿真分析并提出发射策略，验证了2个离合器条件下的摩擦功平衡；周号宇[11]综合考虑了离合器拖曳扭矩特性对汽车起步的影响并建立了不考虑拖曳扭矩特性的DCT汽车起步动力学模型并验证了拖曳扭矩对DCT车辆起步过程影响规律的正确性。

相关研究多针对离合器本身结构特点及内部摩擦进行探究分析，关于现实环境及行驶工况对离合器滑摩功变化的影响研究较少。在现有研究的基础上，本文使用MATLAB/Simulink建立了汽车的传动系统仿真模型，探究不同坡度下湿式DCT起步滑摩功对汽车起步的影响。

1　湿式DCT工作原理及建模

1.1　湿式DCT的工作原理

湿式双离合器由2套规格不同的多片离合器组成，二者共轴安装于充满液压油的密闭油室内，如图1所示。该设计使湿式双离合器具有卓越的温度调节能力，且能够承受并传递高扭矩。离合器在工作时主要分为3种情况：分离、滑摩和接合。在分离阶段，对偶钢片和摩擦片之间充满液压油，此时二者不存在直接接触。在滑摩阶段，对偶钢片和摩擦片之间的油膜受到压缩破裂，油膜厚度随之减小。当其厚度与摩擦片表面粗糙度相同时，对偶钢片和摩擦片表面发生接触。此时，摩擦副进入接合状态，摩擦扭矩逐渐增大至峰值后趋于稳定。随着润滑油膜被挤出接触区，流体润滑状态失效，由油膜剪切产生的粘性扭矩也随之消失，湿式离合器由此进入完全接合阶段。在该阶段，对偶钢片和摩擦片接触表面的摩擦因数由动摩擦因数转变为静摩擦因数。摩擦因数的变化导致摩擦扭矩出现波动，可能导致离合器在完全接合前产生冲击。该波动随后逐渐消失，最终实现对偶钢片和摩擦片完全接合。



注：ω_1为主动盘转速，ω_2为从动盘转速。

图1　湿式DCT结构

1.2　汽车传动系统建模

汽车起步时，发动机传递动力至离合器。离合器接合时，受到摩擦副产生的滑摩功以及车辆行驶阻力的共同作用，动力输出结果会受到影响，如图2所示。鉴于该过程的复杂性，需分别对发动机、汽车行驶时的外部阻力、摩擦副以及汽车传动系统建立数学模型。

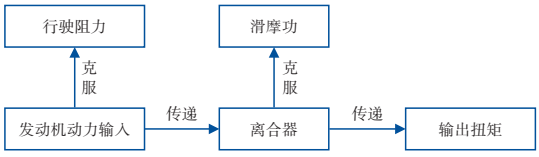


图2　汽车动力传递路径

1.2.1　发动机动态工况下的数学模型

车用发动机开发工作主要基于稳态工况，即转速与负荷基本固定。然而，发动机的应用对象为运载机械，其使用工况通常为变工况，即转速与负荷时刻发生变化。车用发动机的开发工况与使用工况不匹配，导致发动机的实际性能表现明显低于台架稳态试验水平[12]。仅凭理论推导分析难以构建精确的发动机模型，因此通常采用试验测试建立发动机模型。

发动机试验模型可以分为稳态工况模型和动态工况模型。稳态工况是指车辆在固定挡位下平稳行驶的工作状态，而动态工况则主要包括车辆的加速、制动或换挡行驶状况。本文使用处于动态工况下的发动机模型，发动机转速和节气门开度共同决定发动机的输出扭矩，其计算公式可表示为：

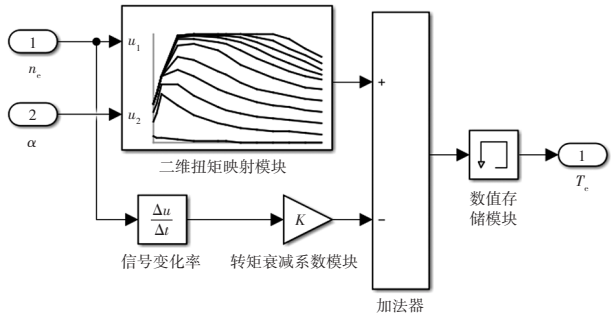
$$T_e = f(n_e,\alpha)\left(1 - k\frac{\mathrm{d}\omega_e}{\mathrm{d}t}\right) \tag{1}$$

式中：T_e为输出扭矩，$f(n_e,\alpha)$为稳态转矩函数，n_e为发动机转速，α为节气门开度，k为转矩衰减系数，ω_e为发动机角速度，$\frac{\mathrm{d}\omega_e}{\mathrm{d}t}$为发动机角加速度，$t$为汽车行驶时间。

根据以上内容，使用MATLAB/Simulink建立模型，如图3所示。在分离阶段，摩擦副未接触，传递扭矩为0；在滑摩阶段，摩擦副不断压紧使其传递扭矩随之变化；在结合阶段，发动机输入功率等于输出功率。湿式离合器的传递扭矩可表示为：

$$T_c = \begin{cases} 0 \\ \mu F N R_m |\omega_e - \omega_c| \\ T_e \end{cases} \tag{2}$$

式中：T_c为湿式离合器传递扭矩，μ为摩擦因数，F为离合器压紧力，N为摩擦面数量，R_m为有效摩擦半径，ω_c为离合器从动端转速。



注：u_1、u_2为输入变量，分别对应n_e、α，K为修正系数。

图3　发动机数学模型

1.2.2　行驶阻力的数学模型

汽车在行驶过程中会遇到的阻力称为行车阻力。汽车行驶的总阻力F_f包括滚动阻力F_e、加速阻力F_j、坡度阻力F_i和空气阻力F_w，可表示为：

$$F_f = F_e + F_j + F_i + F_w \tag{3}$$

在各种行驶工况下，空气阻力和滚动阻力始终存在。其中，滚动阻力是指汽车轮胎与地面之间的摩擦力，空气阻力是指汽车在行驶过程中与空气的摩擦力。坡道阻力和加速阻力仅在特定行驶条件下产生。例如，当车辆在平坦路面上匀速行驶时，不存在坡道阻力和加速阻力。

在汽车行驶过程中，轮胎与路面接触时会使表面发生形变从而产生法向和切向的力，从而产生滚动阻力F_e，可表示为：

$$F_e = Gf\cos\beta \tag{4}$$

式中：G为重力加速度，f为滚动阻力系数，β为道路坡度角。

F_j为汽车加速行驶时必须克服的阻力，可表示为：

$$F_j = \varepsilon m\frac{du_a}{dt} \tag{5}$$

式中：ε为旋转质量换算系数，m为整车质量，u_a为汽车行驶速度。

F_i为指汽车在上坡行驶时重力沿坡道方向的分力产生的阻力，可表示为：

$$F_i = G\sin\beta \tag{6}$$

F_w为汽车在移动中空气对其施加的作用力，可表示为：

$$F_w = \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \tag{7}$$

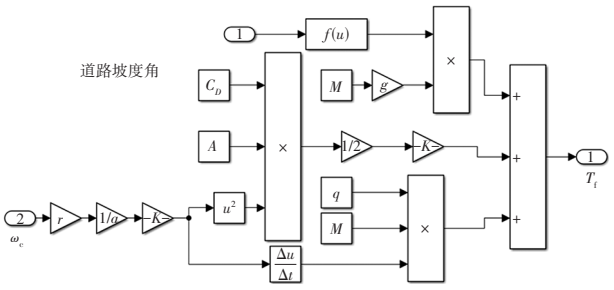
式中：C_D为空气阻力系数，A为迎风面积，u_a为汽车行驶速度。

由行驶阻力公式得到汽车阻力矩公式，可表示为：

$$T_f = \frac{r}{i_g i_0}\left(Gf\cos\beta + \varepsilon m\frac{du_a}{dt} + G\sin\beta + \frac{C_D A u_a^2}{21.15}\right) \tag{8}$$

式中：T_f为汽车阻力矩，r为车轮半径，i_g、i_0分别为变速器1挡速比、主减速比。

通过MATLAB/Simulink构建行驶阻力的数学模型，如图4所示。



注：q为加速度。

图4　汽车行驶阻力矩数学模型

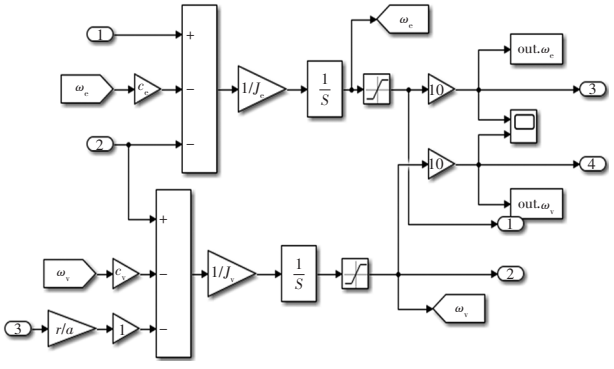
1.2.3　摩擦副滑摩功数学模型

在离合器的接合期间，主动盘与从动盘之间的转速差引起持续的摩擦作用，机械能被转化为热能，导致离合器的温度持续升高。滑摩功的大小受到多种因素影响，工作状态下的滑摩功可表示为：

$$W = \int_0^t T_c[\omega_e(t_1) - \omega_v(t_1)]dt_1 \tag{9}$$

式中：W为湿式离合器滑摩功；T_c为离合器转矩，t_1为离合器接合时间；ω_v为变速器输入轴角速度，即从动盘角速度。

运用MATLAB/Simulink建立摩擦副滑摩功计算数学模型，如图5所示。



注：c_e和c_v为阻尼系数，j_e和j_v为转动惯量，1/S为积分模块。

图5　摩擦副滑摩功计算数学模型

1.2.4　汽车传动系统模型

经上述分析，通过MATLAB/Simulink软件，构建了如图6所示的车辆传动系统动力模型。其中1为发动机模型，2为阻力矩模型，3为传递扭矩模型，4为传动学计算模型，5为滑摩功计算模型。使用该模型进

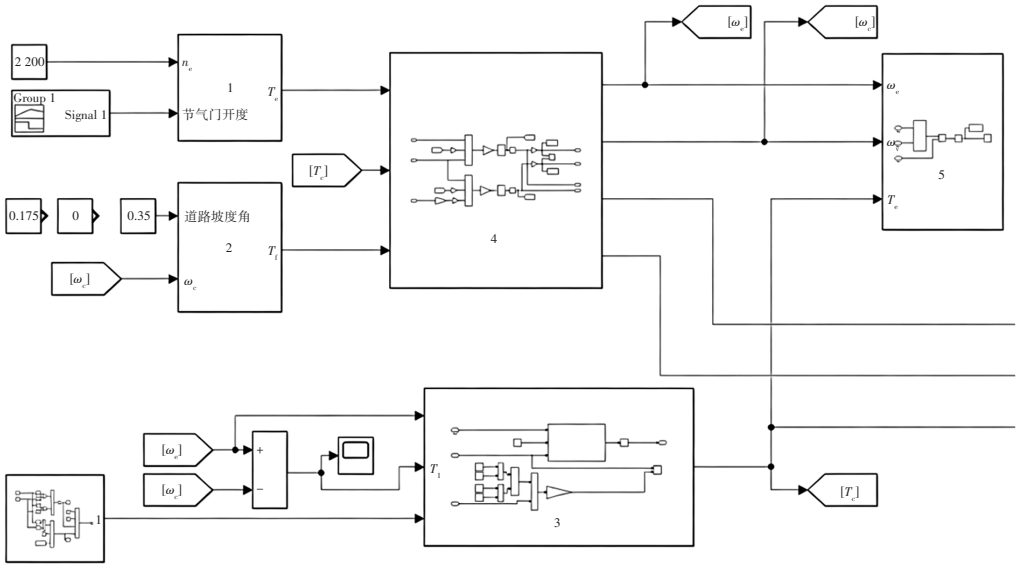


图6　汽车传动系统动力模型

行仿真，可以计算出滑摩功大小。利用车辆传动系统的动力学模型和某特定车型的有关参数，便可以对车辆在0°、10°和20°的坡道起步时湿式离合器的主动端和从动端的旋转速度的变化情况以及滑摩功的大小进行仿真分析。为模拟汽车起步的真实工况，所选用的汽车相关参数如表1所示。

表1　某汽车相关参数

参数名称	数值
整车质量m/kg	1 565
车轮半径r/m	0.37
迎风面积A/m	4.70
变速器速比i_g	4.20
主减速比i_0	3.50
滚动阻力系数f	0.03
转动惯量I_e	0.35
转动惯量I_v	0.30
旋转粘性阻尼系数c_e	0.03
旋转粘性阻尼系数c_v	0.03

2　仿真结果与分析

为了更准确地模拟汽车起步时的工作状况，在建立的汽车传动系统模型基础上，将节气门开度设为0.6，发动机初始转速设置为2 200 r/min，将车辆总质量设置为1 565 kg，再分别对0°、10°和20°的路面坡度情况进行仿真。

如图7所示，汽车在坡度为0°的坡道上起步时，离合器的接合时间为0.53 s。如图8所示，主动端和从动端之间摩擦产生的滑摩功为12.2 kJ。

汽车在路面坡度为10°的坡道上起步时，离合器接合时间增加至0.66 s。如图10所示，主动端和从动端之间摩擦产生的滑摩功为17.4 kJ。

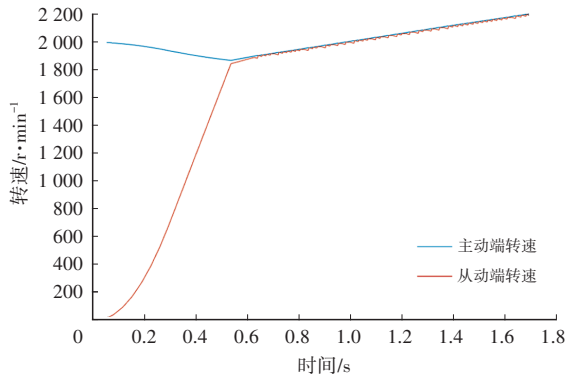


图7　坡度为0°时，主从动端转速变化

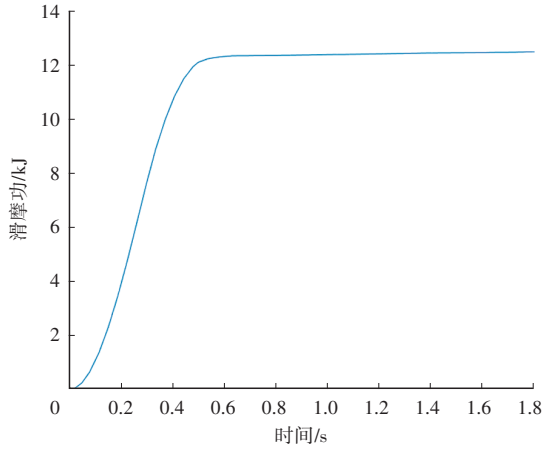


图8　坡度为0°时，摩擦副滑摩功变化

如图11所示，在路面坡度为20°的坡道上起步时，离合器接合时间增加至0.88 s。如图12所示，主动端和从动端之间摩擦产生的滑摩功为25.6 kJ。

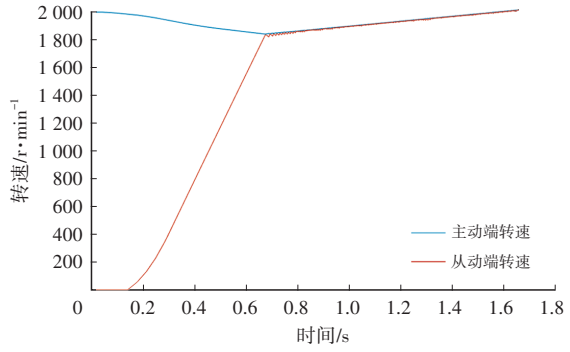


图9　坡度为10°时，主从动端转速变化

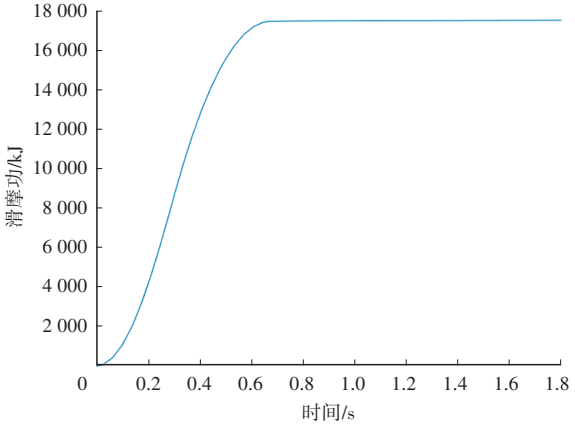


图10　坡度为10°时，摩擦副滑摩功变化

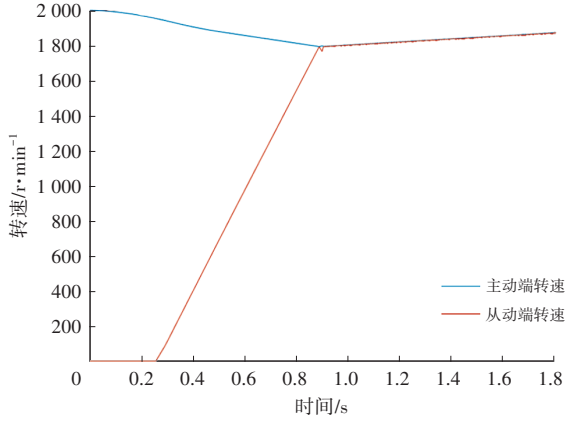


图11　坡度为20°时，主从动端转速变化

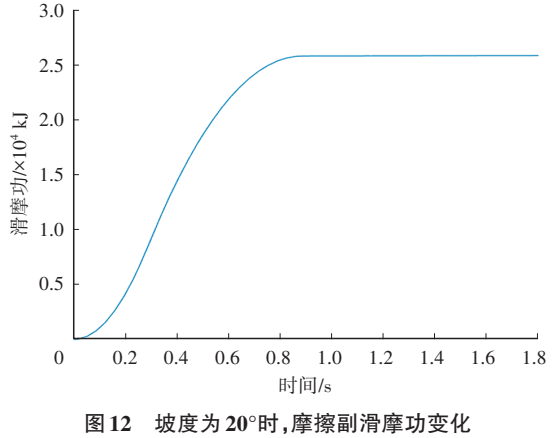


图12　坡度为20°时，摩擦副滑摩功变化

路面坡度从0°增加至10°起步时，主动端和从动端的接合时间增加了0.13 s，滑摩功增加了42.6%，当路面坡度从10°增加至20°起步时，主动端和从动端之间的接合时间增加了0.22 s，滑摩功增加了47.1%。离合器接合的时间随坡度增加而逐渐变长，产生的滑摩时间也越来越长，滑摩功也在逐渐增加。滑摩功的增加会导致离合器温度升高，进而影响整个传动系统的性能和寿命。此外，长时间的接合也会增加离合器的磨损，降低其寿命，可能需要更频繁地进行维护和更换。因此，为了确保离合器的正常运行和延长其寿命，应该尽量避免长时间的接合操作，减少滑摩功的产生。

仿真结果表明随着坡度增加，起步时离合器接合时间延长，进而滑摩功持续增加。这不仅加剧了能量损失，同时使离合器温度升高，影响整个传动系统的性能。此外，长时间的接合也会增加离合器的磨损，缩短其使用寿命。

3　结束语

本文在相关研究基础上，对车辆起步仿真模型进行了验证。引入多源车辆参数与路面条件，重点探究不同坡度对起步过程及关键部件的影响规律。本研究以湿式双离合变速器为对象，分析了路面坡度在0°~10°与10°~20°阶段起步时离合器主、从动端接合时间与摩擦副滑摩功的变化特征。研究结果表明，离合器接合时间随路面坡度增加而延长，摩擦副滑摩功呈递增趋势。该结论可为车辆坡道起步的工程应用及故障预防提供理论支撑。然而，本文仅选取了一种车型进行研究，坡度变化范围有限，后续研究建议可以通过扩大坡度和增加不同的车型，对模型的普适性和准确性进行进一步验证。

参　考　文　献

[1] 白景峰, 樊立桃, 田广召, 等. 湿式双离合自动变速器起步平顺性分析及优化[J]. 汽车科技, 2023(3): 32-36.

[2] 王东洋. DCT车辆起步与换挡过程摩擦振动特性分析及控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

[3] 周启豪. 起步工况湿式离合器滑摩与热负荷特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.

[4] 王成. 考虑湿式离合器动态接合特性的DCT车辆起步控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.

[5] WANG Y S, CHENG X S, LI X S, et al. Launch Control of Wet Dual Clutch Transmission Based on Fuzzy Logic[C]// Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE). IEEE, 2011: 419-422.

[6] 刘云. 双离合自动变速器换挡品质仿真研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
[7] SUN W, HUA Y L, LIU G Q. A Test Study of Wet Dual Clutch Transmission during Vehicle Launch[J]. Advanced Materials Research, 2012(490/491/492/493/494/495): 86-90.
[8] 郝洪涛, 严冬, 马辉. 湿式双离合器扭矩传递特性对换挡品质影响的研究[J]. 传动技术, 2019, 33(3): 14-19.
[9] 方宏胜. DCT湿式离合器转矩特性分析及试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
[10] JIA G Z, WU X P, JIA Z H. Dual Clutch Automatic Transmission Two Clutch Starting Control and Simulation[J]. Advanced Material Research, 2013(372): 538-542.
[11] 周号宇. 考虑拖曳转矩影响的湿式双离合变速器车辆起步与换挡分析及试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
[12] 郭涛. 动态工况下汽油机性能量化方程研究及在整车能量流测评中的应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.

（责任编辑　**梵玲**）

《汽车文摘》征文

《汽车文摘》(月刊)于1963年7月3日创刊,由国务院国有资产监督管理委员会主管、中国第一汽车集团有限公司主办,为中国汽车工程学会会刊。《汽车文摘》以“览全球汽车技术文献,指中国汽车技术之道”为使命,以打造“中国汽车前沿与创新技术传播与交流的重要平台”为愿景,致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。

《汽车文摘》深耕电动化、智能化、网联化、共享化和智能制造5大方向和10大领域,聚焦新能源、燃料电池与混合动力汽车、智能网联汽车、氨氢融合零碳和碳中性燃料、汽车安全、健康与舒适、碳达峰与碳中和、生命周期评价(LCA)与技术经济分析、智能制造、材料轻量化与一体化压铸、飞行汽车前沿与创新技术综述论文,揭示相关领域的新动态、新趋势、新技术和新进展,为广大科研和工程技术人员进一步发展这一领域提供新突破口、新出发点和新基准。

欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员,充分发挥专业领域优势,深度挖掘国内外高影响力学术期刊与其它文献,形成某个技术领域前沿综述。

《汽车文摘》选题范围:

电动化:混合动力关键技术;动力电池关键技术;先进充电技术;电驱动系统及电力电子技术;智能底盘及子系统线控关键技术;燃料电池动力系统设计与优化。

智能化:新型电子电气架构;自动驾驶感知、决策与运动控制;智能新能源汽车测试评价方法与工具链;车辆智能安全技术。

网联化:智能网联云控技术;车用通信及网络技术;车路协同技术;汽车人因、人机交互与智慧座舱;信息安全与预期功能安全;车网融合(V2G)及应用。

低碳化:汽车节能与排放技术;清洁能源动力系统技术;碳达峰、碳中和;氢燃料制、储、运、加及安全管控技术;生命周期评价(LCA)、标准法规与技术经济分析;氨氢融合零碳和碳中性燃料。

轻量化:新能源汽车新材料技术;混合材料轻量化设计;一体化压铸。

共享化:区块链技术与移动出行;车辆大数据挖掘方法与应用案例。

燃料电池:电池堆、电池系统与基础设施。

智能制造:机器人与自动化控制、四大工艺、物流技术、设计-制造-服务。

颠覆式出行:飞行汽车;未来低空智能交通体系及其关键技术。

汽车安全:主被动安全与融合;智能安全;健康与舒适。

《汽车文摘》发表论文的独特优势:

《汽车文摘》是国家级刊物、中国汽车工程学会会刊、汽车领域唯一的综述期刊。《汽车文摘》不收版面费、4个月左右可发稿。

投稿要求:

1. 综述篇幅在10 000 ~ 15 000字(6~10页),图文并茂,图、表和公式非原创要求标注引用文献;

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数约200字;

3. 文章必须附有公开发表、体现本领域最新研究成果和高影响力出版物作为参考文献,一般要求参考文献在20篇以上,一半左右为外文参考文献,且在文中标注所引用文献;

4. 来稿保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;

5. 切勿一稿多投。

《汽车文摘》投稿网址:http://www.qcwz.cbpt.cnki.net

邮箱:autodigest@faw.com.cn

《汽车文摘》编辑部