

基于移动平均窗口法的自动变速箱空挡滑行控制策略优化

甄雷^{1,2}, 张成伟^{1,2}, 温鹏博^{1,2}, 邵宏鑫^{1,2}, 欧阳虎威^{1,2}, 王德成^{1,2}

1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061

摘要:为提高商用车自动变速箱空挡滑行时的最优燃料经济性,分析自动变速箱空挡滑行控制过程燃料喷射质量及经济性影响因素,采用基于时间的移动平均窗口法优化空挡滑行控制策略并结合道路试验路谱分析结果进行验证。结果表明:车辆进入、离开怠速工况时燃料消耗质量固定,空挡滑行过程中总燃料消耗质量与进入、退出空挡滑行控制的次数和单次滑行时间有关;减小进入、退出空挡滑行控制的次数,减少时间较短的空挡滑行,保留时间较长的空挡滑行,可提高车辆燃料经济性;对于道路试验,采用优化后的空挡滑行控制策略,百公里燃料消耗质量由31.950 kg降低为31.728 kg,节省0.222 kg。

关键词:自动变速箱;空挡滑行;经济性;控制策略

中图分类号:U463

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)03-0029-06

引用格式:甄雷,张成伟,温鹏博,等.基于移动平均窗口法的自动变速箱空挡滑行控制策略优化[J].内燃机与动力装置,2025,42(3):29-34.

ZHEN Lei, ZHANG Chengwei, WEN Pengbo, et al. Optimization of control strategy for automatic transmission neutral coasting using moving average window method [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(3): 29-34.

0 引言

空挡滑行指车辆行驶过程中,变速器置于空挡,发动机和驱动轮离合器分离,利用车辆惯性行驶的操作方法^[1]。商用车空挡滑行能够有效减小滑行阻力,减少燃料消耗,提高车辆燃料经济性,但车辆空挡滑行时无法利用发动机制动,使刹车片发热,增加磨损,影响车辆制动性能,严重时可能危及行车安全^[2-3]。

商用车变速箱空挡滑行控制策略的精确控制与燃料经济性及行车安全密切相关^[4],研究人员针对变速箱空挡滑行控制策略对燃料经济性的影响开展了大量研究:周星星等^[5]研究表明,空挡滑行电控技术可在保证行车安全的前提下,有效改善整车燃料经济性和驾驶平顺性,并有利于提高整车热管理性能,降低排放,但该研究未对不同运行工况进行分类统计和分析;王奕睿等^[6]基于车辆动力学方程分析重型商用车自动变速箱(automated manual transmission, AMT)空挡滑行策略下的燃料经济性,采用等效百公里燃料消耗评价空挡滑行、带挡滑行、等速行驶等工况下的综合能耗,研究结果表明不同工况对车辆燃料经济性的影响差异较大;黄冲等^[7]针对不同工况采用不同滑行模式,实现对AMT换挡操作的精细控制,车辆经济性明显提高。

针对特定工况下变速箱空挡滑行控制策略对燃料经济性的影响,村妹^[8]研究发现采用电喷发动机的车辆在拥堵工况空挡滑行时油耗增大,并且驾驶感受降低;周阳^[9]研究表明,空挡滑行阻力是车辆经济性评价的关键指标;吴琮等^[10]通过增加安全滑行停机逻辑判断,结合低速滑行控制策略,有效提高了车辆

收稿日期:2025-02-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000302)

第一作者简介:甄雷(1994—),男,石家庄人,工程师,主要研究方向为整车与发动机控制,E-mail:547069357@qq.com。

燃料经济性。

研究表明,空挡滑行控制策略下的燃料经济性与车辆运行状态和行驶路况存在显著关联:车辆维持空挡滑行怠速工况时,虽需消耗燃料维持运转,但由于此时发动机做功减少,车辆运行阻力减小,燃料消耗减少;若此时退出空挡滑行,发动机转速由怠速转速上升至正常转速,燃料消耗增加。本文中通过分析 AMT 空挡滑行控制原理,提出基于时间的移动平均窗口法(moving average window method,MAW) AMT 空挡滑行优化控制策略,结合道路试验验证控制策略优化后的燃料经济性改善效果。

1 空挡滑行控制

1.1 控制策略

AMT 空挡滑行控制是一种通过离合器断开连接发动机与变速箱,利用车辆惯性滑行以减少燃料消耗的控制方法。AMT 换挡控制单元(transmission control unit,TCU)通过传感器实时监测车速、油门开度、制动踏板幅度等参数,判断车辆是否进入空挡滑行条件^[11],并在滑行过程中控制车辆依靠惯性前行;同时,TCU 根据传感器信号判断是否退出空挡滑行状态;当需要再次加速时,发动机电子控制单元(electronic control unit,ECU)迅速控制离合器接合,恢复动力传递,确保驾驶平顺性和响应性。不同厂家变速箱控制方法略有差异,但核心控制策略基本相同,空挡滑行控制策略示意图如图 1 所示。

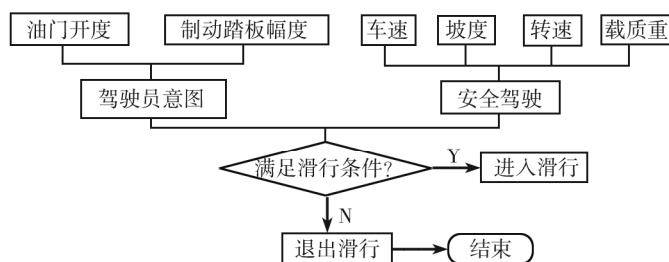


图 1 空挡滑行控制策略示意图

TCU 根据驾驶员意图、安全驾驶两方面判断车辆是否进入空挡滑行:结合油门开度、制动踏板幅度分析驾驶员驾驶意图,若油门开度小于阈值且制动踏板幅度较小,TCU 分析车辆此时既不需要动力行驶,也不需要减速,判断车辆具备进入空挡滑行条件,结合车速、道路坡度、发动机转速、载质量 4 个方面进行安全驾驶分析,坡度太大会造成驾驶员立即踩油门或踩刹车,车速过快易造成刹车困难,发动机转速过高易造成车辆紧急制动引起飞车,载质量超标会造成刹车困难,当车辆运行在合适的坡度、车速、发动机转速、载质量时,判断此时车辆为安全驾驶,具备进入空挡滑行的条件。驾驶员意图、安全驾驶的判定阈值均可在 TCU 中标定和修改,适配不同类型的整车需求。

1.2 燃料消耗分析

进入、退出空挡滑行控制过程中的燃料喷射质量和发动机转速示意图如图 2 所示。

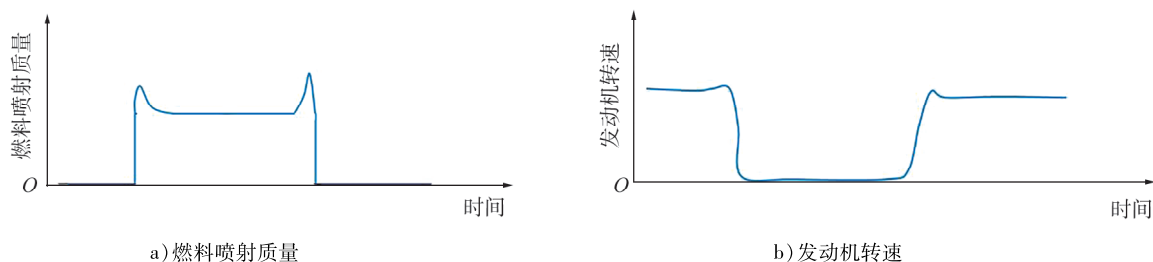


图 2 空挡滑行过程中的燃料喷射质量和发动机转速示意图

由图 2 可知:进入空挡滑行过程时,发动机转速迅速降低,进入怠速工况;一次空挡滑行过程的燃料消耗可以分为进入怠速工况时的燃料消耗质量、维持怠速区间的燃料消耗质量、离开怠速工况的燃料消耗质量 3 部分;由于进入及离开怠速工况时的燃料消耗质量固定,怠速区间内的燃料消耗质量与怠速时间成正比,空挡滑行过程总燃料消耗质量与进入、退出空挡滑行的次数和空挡滑行持续时间有关。

某商用车进入、退出空挡滑行控制过程中的燃料消耗质量流量和发动机转速如图3所示,图中 m_s 为燃料消耗质量流量, n 为发动机转速。由图3可知:车辆进入空挡滑行时,发动机转速减小,燃料消耗质量流量增大;车辆在空挡滑行过程中,发动机怠速运转,燃料消耗质量流量轻微减小后趋于稳定;当车辆退出空挡滑行时,发动机转速升高,燃料消耗质量流量明显增大;当发动机转速升高到设定转速时,燃料停止喷射。分析原因为:车辆空挡滑行时,发动机怠速运转,摩擦阻力矩减小,整车运行阻力减小,使燃料消耗质量流量减小;车辆退出空挡滑行时,发动机转速增大,整车运行阻力增大,燃料消耗质量流量增大。空挡滑行可以增加车辆滑行距离,减小燃料喷射质量,单次进入空挡滑行的时间越长,越有利于提高燃料经济性;但频繁进入、退出空挡滑行,不利于提高燃料经济性。

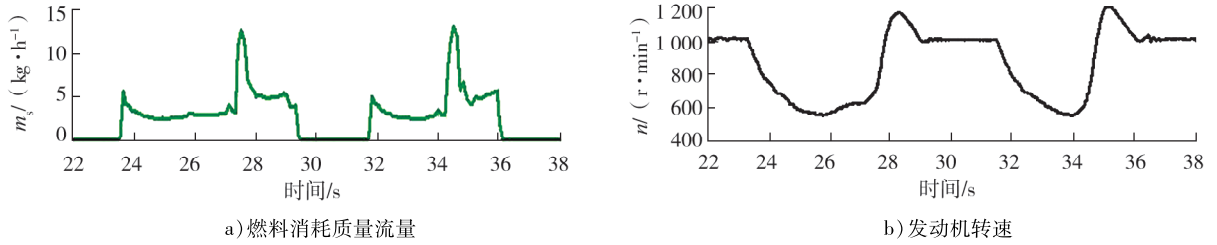


图3 进入、退出空挡滑行控制过程中的燃料消耗质量流量和发动机转速

1.3 经济性寻优

空挡滑行过程中涉及的能耗可折算为对应的燃料消耗质量,空挡滑行过程中减少的阻力折算为做正功时的燃料消耗质量,用于分析空挡滑行的燃料经济性;同时设计控制方法,判断空挡滑行条件后推算滑行时间,使单次进入空挡滑行的时间增大,避免车辆频繁进入、退出空挡滑行状态。

1.3.1 经济性计算

滑行期间减少的阻力对应的转矩总和

$$T_l = \sum_{i=0}^{t_1} T_i(n) + \sum_{i=0}^{t_1} T_{i,0}, \quad (1)$$

式中: t_1 为空挡滑行总怠速时间,s; $T_i(n)$ 为电子控制单元函数,表示滑行时间为*i*、发动机转速为*n*时对应的摩擦转矩, $N \cdot m$; $T_{i,0}$ 为滑行时间为*i*时的附件转矩, $N \cdot m$ 。

单次空挡滑行总能耗对应的燃料消耗质量

$$m_l = ct_d + m_1 - kT_d, \quad (2)$$

式中: c 为怠速工况单位时间能耗对应的燃料消耗质量, kg/s ; t_d 为单次空挡滑行时间,s; m_1 为进入、退出空挡滑行时的能耗总和对应的燃料消耗质量, kg ; k 为能量转换系数, $kg/(N \cdot m)$;可直接由发动机ECU读取; T_d 为单次空挡滑行期间减少的阻力对应的转矩, $N \cdot m$ 。

综合式(1)(2)可知: $m_l < 0$ 表示此次空挡滑行节约了燃料消耗,收益为正; $m_l > 0$ 表示此次空挡滑行未节约燃料消耗,收益为负。

1.3.2 经济性影响因素分析

为分析经济性主要影响因素,简化式(2),假定空挡滑行过程中平均阻力为 $\bar{F}$, m_1 、 k 在单次滑行过程中可认为是常数,此时单次空挡滑行能耗对应的燃料消耗质量

$$m_l = (c/k - \bar{F})kt_d + m_1. \quad (3)$$

通常 $(c/k - \bar{F}) < 0$,式(3)示意图如图4所示。由图4可知:燃料消耗质量与 t_d 明显相关; $m_l = 0$ 时对应最优滑行时间为 t_0 ;当 $t_d > t_0$ 时, $m_l < 0$,即空挡滑行节约了燃料消耗质量,收益为正。

1.3.3 道路试验经济性分析

为分析空挡滑行试验经济性,以某16挡AMT牵引车为例

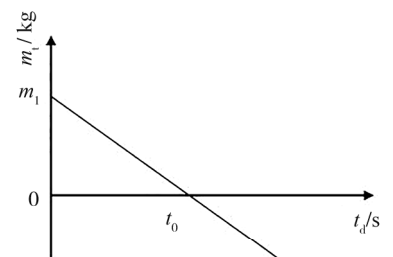


图4 式(3)示意图

在某普通国道进行道路试验,该牵引车为天然气发动机,驱动形式为 6×4,运行距离为 1.0 km,牵引车及其发动机主要参数如表 1 所示,道路试验路谱分析结果如图 5 所示。

表 1 某牵引车及其发动机主要参数

载质量/t	驱动桥速比	16 挡速比	轮胎型号	排量/L	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	最大转矩/(N·m)
49	3.36	0.818	12R22.5	12.9	397	1 900	2 500

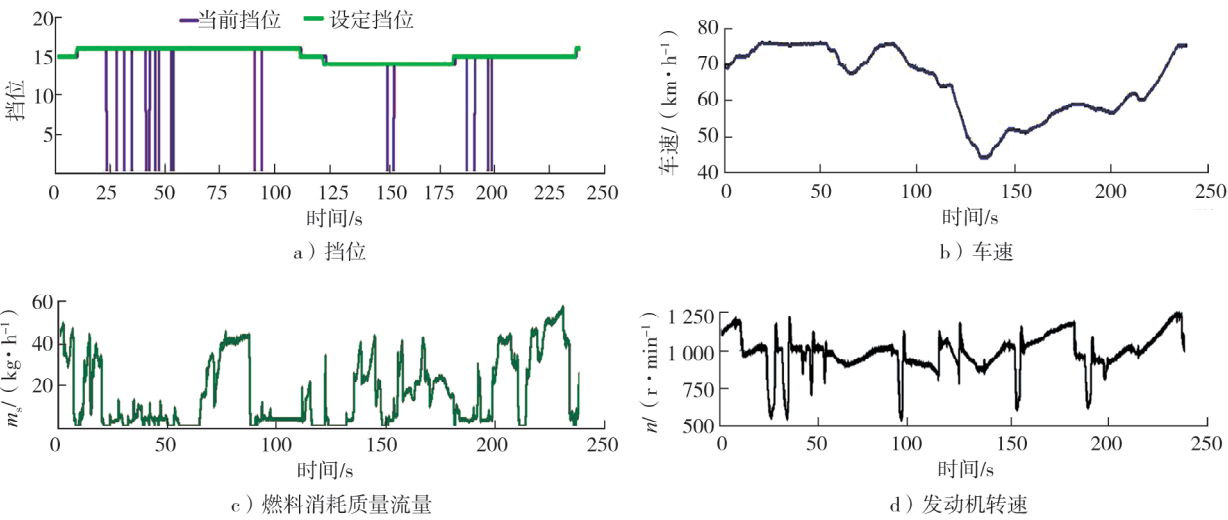


图 5 道路试验路谱分析

由图 5 可知:该段路谱共计 239 s,整个试验过程进入、退出空挡滑行 9 次,根据式(2)计算试验路谱单次空挡滑行能耗对应的燃料消耗质量,结果如表 2 所示。

表 2 试验路谱单次空挡滑行能耗对应的燃料消耗质量

序号	m_t/g	t_d/s	序号	m_t/g	t_d/s	序号	m_t/g	t_d/s
1	0.34	4.7	4	0.20	1.7	7	0.30	3.3
2	0.29	3.5	5	0.13	1.1	8	0.34	3.5
3	0.15	1.6	6	0.32	3.3	9	0.15	1.2

由表 2 可知:整个道路试验进入、退出空挡滑行共 9 次,累计空挡滑行时间为 23.9 s,对应的总燃料消耗质量为 2.22 g,即该段路谱中总经济收益为负。

本次空挡滑行试验燃料消耗质量流量为 4.9 kg/h,平均阻力对应的转矩为 79.6 N·m, $k = 0.11 \text{ kg}/(\text{N} \cdot \text{m})$, $m_1 = 14.957 \text{ g}$,根据式(3),计算该车辆道路试验 $t_0 = 14.04 \text{ s}$,即当单次滑行时间超过 14.04 s 时,经济性收益为正。该车辆路谱采集过程中单次空挡滑行时间均未超过 14.04 s,分析该车变速箱频繁进入、退出空挡滑行,不利于提高空挡滑行燃料经济性和驾驶感受。

2 空挡滑行控制策略优化

2.1 移动平均窗口法

基于经济性、安全性与驾驶平顺性等多目标优化调整变速箱进、退空挡滑行控制策略是重要的研究方向。MAW 是一种数据序列统计方法,常用于消除动态误差,提高鲁棒性^[12-13]。MAW 通过固定窗口(如时间或其他参数)对局部数据(如燃料消耗质量为 10 kg 或行驶里程为 5 km 等)进行平均计算,常用

于提取某个参数的趋势性变化,该方法能够平滑曲线,延迟滤波,排除偶然因素干扰,有效减小短期波动对整体趋势的影响^[14]。

采用MAW优化变速箱空挡滑行控制策略,优化后的控制策略如图6所示。优化后的控制策略分为:滑行判断区、窗口计算区、公式计算区和安全检测区。对比图1的控制策略,优化后的控制策略增加了窗口计算区和安全检测区。本文中的优化控制策略仅增加了窗口计算区,安全检测区是未来优化策略发展方向之一。

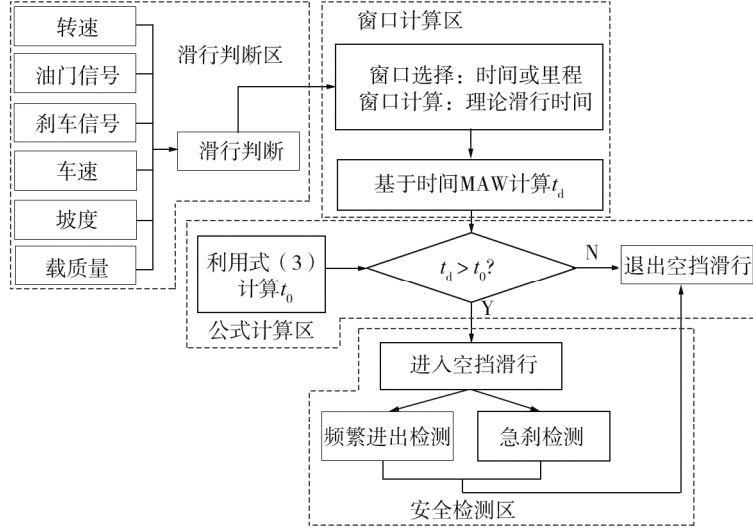


图6 窗口法应用策略图

在窗口计算区使用固定的时间或里程计算理论滑行时间,本文中采用基于时间的移动平均窗口法预估当前工况的理论滑行时间 t_d ;在公式计算区,通过式(3)计算 t_0 ,并与 t_d 比较,判断是否进入空挡滑行。 t_d 增大,可减少进入空挡滑行的次数,更好适应实际驾驶情况。该优化策略可以过滤掉时间较短的空挡滑行,保留时间较长的空挡滑行,提高经济性。实车道路验证表明,采用该优化策略后,百公里燃气消耗质量由31.950 kg降至31.728 kg,百公里节省燃气消耗质量为0.222 kg,相对燃气消耗率降低了0.7%。

2.2 安全检测优化方向

驾驶员频繁紧急制动时,不利于进入空挡滑行,采用安全因数 d 评价车辆是否紧急制动,优化安全检测环节。安全因数

$$d = |a_0/a|, \quad (4)$$

式中: a_0 为安全制动减速度, m/s^2 ,根据不同车型,由ECU自动获取; a 为车辆制动减速度, m/s^2 。

安全因数控制策略如图7所示,车辆进入空挡滑行状态时结合车速、制动踏板幅度及 t_0 进行安全性分析。当踩下制动踏板时,若 $d \leq 1$,判断车辆紧急制动,不能进入空挡滑行,修正安全因数 d ,再次判断能否进入空挡滑行;若 $d > 1$,判断车辆安全,可以进入空挡滑行阶段。

考虑安全因数的影响,单次空挡滑行能耗对应的燃料消耗质量

$$m_t = (c/k - \bar{F})kdt_d + m_1. \quad (5)$$

由式(4)可知:制动减速度越大,安全因数越小。此外,安全因数还应综合驾驶员的驾驶特性,进入、退出空挡滑行的频次,ECU数据(如油门踏板的特性、油门及刹车的频次、驾驶员加减速度的正态分布

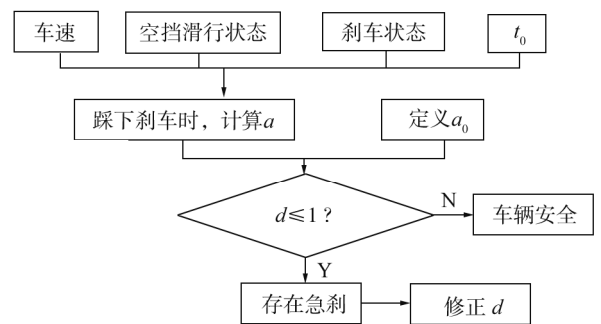


图7 安全因数控制策略图

等)等,进行标定分析,准确的安全因数判定方法是未来空挡滑行安全检测的一个发展方向。

3 结论

1) 基于车辆运行工况空挡滑行燃料经济性指标量化分析表明,空挡滑行过程总燃料消耗与进入、退出空挡滑行的次数和空挡滑行持续时间有关,减少进入、退出空挡滑行的次数,且单次进入空挡滑行的时间大于最优滑行时间时,能够节约燃料消耗,实现经济正收益。

2) 相同道路行驶工况下,采用移动平均窗口法优化空挡滑行控制策略后,百公里燃气消耗质量由 31.950 kg 降至 31.728 kg,表明移动平均窗口法可提高空挡滑行燃料经济性。

3) 变速箱空挡滑行控制策略在经济性、平顺性等方面还存在优化空间,准确的安全因数判定方法是未来空挡滑行策略的重要优化方向。

参考文献:

- [1] 陈常青. 影响汽车性能的驾驶方式分析[J]. 湖北农机化, 2019(13): 30.
- [2] 贺德阳. 车辆在大桥斜面空挡滑行的动力学与危害分析[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2016, 34(4): 39-43.
- [3] 李磊, 章国胜, 宋健, 等. 自动手动变速器(AMT)下坡工况控制策略[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1290-1292.
- [4] 景甜甜, 李昊, 高婷, 等. 双离合自动变速箱节油控制优化方法研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2025, 42(1): 85-90.
- [5] 周星星, 朱彬. 空挡滑行电控技术在商用车上的应用研究[J]. 内燃机, 2023, 39(6): 56-62.
- [6] 王奕睿, 吴慧敏, 周新伟, 等. 重型商用车 AMT 空挡滑行策略节油原理分析[C]// 中国汽车工程学会年会 2023 论文集. 北京: 机械工业出版社, 2023: 76-80.
- [7] 黄冲, 陈玉俊, 徐世杰, 等. 基于多意图预测的 AMT 滑行模式决策控制方法及装置: CN118419027A[P]. 2024-08-02.
- [8] 村妹. 不能不知的十种省油误区[J]. 交通与运输, 2016, 32(2): 76.
- [9] 周阳. 整车空挡滑行阻力特征及应用研究[J]. 环境技术, 2019, 37(4): 115-120.
- [10] 吴琼, 李卫兵, 舒洁. 低速滑行停机节油技术研究[J]. 汽车技术, 2016(7): 57-61.
- [11] 刘森. 基于某商用车的 16 挡 AMT 控制系统研究[D]. 十堰: 湖北汽车工业学院, 2023.
- [12] 任烁今, 张超, 李刚, 等. 基于远程监控三区移动平均窗口法重型车排放特征[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(3): 375-384.
- [13] 马志磊, 何超, 李加强, 等. 窗口法与累积平均法的轻型车 RDE 结果对比研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(9): 430-439.
- [14] 刘庆波, 侯永平, 严聪龙. 轿车带挡与空挡滑行燃油经济性对比分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2013, 31(6): 847-849.

Optimization of control strategy for automatic transmission neutral coasting using moving average window method

ZHEN Lei^{1,2}, ZHANG Chengwei^{1,2}, WEN Pengbo^{1,2}, SHAO Hongxin^{1,2},
OUYANG Huwei^{1,2}, WANG Decheng^{1,2}

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China;

2. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China

Abstract : In order to improve the fuel economy of commercial vehicle automatic transmissions during neutral
(下转第 49 页)

[12] 付平,常德功. 密封设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

Analysis on the sealing failure of a diesel engine crankshaft oil seal and its improvement

XU Tongwei, YU Han, LIU Jia, JIA Demin

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: To reduce the seal failure rate of diesel engine crankshaft oil seals, market failure data of a certain platform's diesel engine crankshaft oil seals is statistically analyzed. Using fishbone diagrams, possible causes of oil seal failure and leakage are analyzed from six aspects: human, machine, material, method, environment, and measurement. The root cause of failure is verified through comparative tests of oil seal reliability from different suppliers and oil seal consistency assessment bench tests. On this basis, the improvement measures to reduce the sealing failure rate are proposed and tracked in the market. The results show that the failure rate of oil seals for cement mixer trucks is the highest, and the failure rate of the rear oil seal is significantly higher than that of the front oil seal. The main failure modes of faulty oil seals include main lip line failure, eccentric wear, and felt fuzzing. The main reasons for seal failure are the insufficient of followability of the oil seal and the inadequate density of the rubber material, defective production assembly process, uncoated end caps and gear shaft end faces, and poor assembly performance of combination oil seals. The oil seal parameters are optimized, as well as the injection vulcanization process, gluing on end caps and gear shaft heads, and assembly processes. After improvement, the failure rate of the oil seal market has significantly decreased.

Keywords: diesel engine; oil seal; seal failure; durability test; improvement measure

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第34页)

coasting, the fuel injection quality and economic influencing factors of the automatic transmission neutral slip control process are analyzed. The neutral slip control strategy is optimized based on the time-based moving average window method and verified by combining road test spectrum analysis. The results show that the fuel consumption mass is fixed when the vehicle enters and leaves the idle condition, and the total fuel consumption mass during neutral coasting is related to the number of times when it enters and exits neutral coasting control and the duration of a single coasting. Reducing the frequency of entering and exiting neutral coasting control, minimizing short duration neutral coasting, and retaining longer duration neutral coasting can improve vehicle fuel economy. For the road test, the optimized neutral sliding control strategy is adopted to reduce the gas consumption per 100 km from 31.950 kg to 31.728 kg, saving 0.222 kg in gas consumption per 100 km.

Keywords: automatic transmission; neutral coasting; economy; control strategy

(责任编辑:胡晓燕)