

基于灰色关联和模糊理论的双离合变速器车辆起步品质评价*

刘海江 余子键

(同济大学,上海 201804)

【摘要】针对目前双离合变速器(DCT)车辆起步评价以驾驶员主观评价为主,主观性过强导致评价不准确的问题,基于灰色关联分析法和模糊综合评价法建立了DCT车辆起步品质评价体系。考虑动力性、舒适性和经济性,选取起步响应延迟时间、起步加速时间、起步加速度峰值、发动机转速波动以及冲击度作为评价指标;使用变异系数法计算了各指标的客观权重,并基于灰色关联分析法明确了各指标与起步品质的关联度排序,验证了权重计算结果的准确性与可靠性;最后,基于模糊综合评价法建立起步品质评价模型并进行客观评分,使DCT车辆的起步品质评价更加客观真实。

主题词:双离合变速器 起步品质 评价指标 灰色关联分析 模糊综合评价

中图分类号:U461.2 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20220892

Evaluation of Starting Quality of DCT Vehicles Based on Grey Relation and Fuzzy Theory

Liu Haijiang, Yu Zijian

(Tongji University, Shanghai 201804)

【Abstract】At present, the starting evaluation method of Dual Clutch Transmission (DCT) vehicles is mainly based on the driver's subjective evaluation. Too much subjectivity leads to inaccurate evaluation. In view of the above problems, a DCT vehicle starting quality evaluation system was established based on the grey relational analysis method and the fuzzy comprehensive evaluation method. In this study, power, comfort and economy were considered, and starting quality evaluation indicators including starting response delay time, starting acceleration time, starting acceleration peak, engine speed fluctuation and shock were selected as evaluation index. The coefficient of variation method calculated the objective weight of the starting quality evaluation indicators, and based on the grey relational analysis method, the order of the correlation degree between each index and the starting quality was clarified, which verified the accuracy and reliability of the weight calculation results. Finally, based on the fuzzy comprehensive evaluation, the starting quality evaluation model of DCT vehicles was established and objectively scored, which made the starting quality evaluation of DCT vehicles more objective and true.

Key words: Dual Clutch Transmission (DCT), Starting quality, Evaluation index, Grey relational analysis, Fuzzy comprehensive evaluation

【引用格式】刘海江,余子键.基于灰色关联和模糊理论的双离合变速器车辆起步品质评价[J].汽车技术,2023(5):34-39.

LIU H J, YU Z J. Evaluation of Starting Quality of DCT Vehicles Based on Grey Relation and Fuzzy Theory[J]. Automobile Technology, 2023(5): 34-39.

1 前言

起步控制是双离合变速器(Dual Clutch Transmission, DCT)车辆研发中的重点和难点,从对驾驶员起步意图的识别开始,车辆起步时离合器的接合以及滑摩功和冲

击度方面的问题、起步时的速度、车辆的燃油经济性、动力传递问题以及控制系统方面的问题,在起步研究中均需考虑^[1]。针对DCT车辆起步品质的评价,目前以主观评价为主,多选择有经验的驾驶员进行主观评价,通过多次驾驶或多人试验减少主观性带来的影响,但不同驾

*基金项目:国家自然科学基金项目(U1764259)。

驾驶员对起步品质的评价标准不同,同一驾驶员的评价标准也存在轻微变动。

周维等^[2]提出了一种基于组合权重和改进逼近理想解排序(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)法的动力总成驾驶性客观评价工况优选方法;Gyeonghwi等^[3]基于连续高斯密度混合隐马尔可夫模型提出了驾驶员起步意图识别模型,在一定程度上解决了DCT车辆起步意图的识别问题;罗勇等^[4]提出了基于驾驶员意图识别的车辆起步控制策略;张迪等^[5]基于灰色关联分析法针对车辆动力换挡特性提出了客观评价方法,建立了各影响因子与整车动力性、经济性、舒适性和传动系统寿命的映射关系;雷云龙等^[6]基于层次分析法确定了各项指标权重,并基于仿真技术建立了起步品质评价模型,但权重的确定过程具有较强的主观性,使其评价结果的稳定性难以保证。上述方法各有优势,对起步品质评价研究有一定的参考价值,但大都存在主观性因素影响较大、结果不稳定等问题。

针对以上问题,本文选择灰色关联分析法和模糊综合评价法建立DCT车辆起步品质评价体系。首先通过对车辆起步控制机理进行研究,确定起步评价体系的指标;然后,使用变异系数法计算各项评价指标的权重,基于模糊综合评价法建立起步品质评价模型并进行客观评分;最后设计试验,对构建的起步品质评价模型进行验证。

2 起步品质评价体系的指标确定

2.1 起步过程力学分析

汽车在起步过程中受到驱动力 F_i 与起步阻力 F_r 的共同作用,二者平衡:

$$F_i = F_r \quad (1)$$

F_r 主要来源于加速阻力 F_j 、滚动阻力 F_r 、空气阻力 F_w :

$$F_r = F_j + F_r + F_w \quad (2)$$

其中:

$$F_j = \delta m \frac{du}{dt} \quad (3)$$

$$F_r = fmg \quad (4)$$

$$F_w = 0.5 C_D \rho A u^2 \quad (5)$$

式中, δ 为汽车旋转质量换算系数; m 为汽车质量; u 为车速; f 为滚动阻力系数; C_D 为空气阻力系数; A 为汽车迎风面积; ρ 为空气密度。

起步工况下DCT系统的动力传动情况^[7]如图1所示。

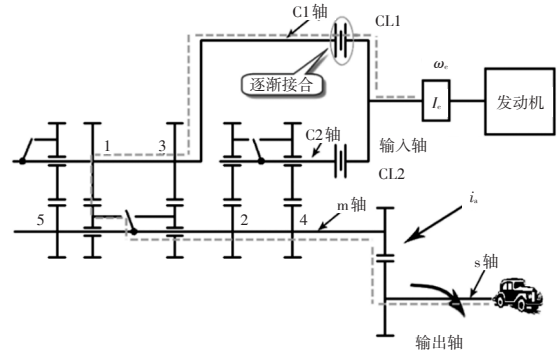


图1 起步工况DCT系统动力传递示意

进入起步工况时,DCT采用单离合器起步,C1离合器主动部分与从动部分开始接合,动力传递过程中发动机、C1轴、m轴和s轴的转矩方程分别为:

$$T_i - T_{c1i} - b_c \omega_c = I_c \frac{d\omega_c}{dt} \quad (6)$$

$$T_{ic1} - T_{mc1} - b_{c1} \omega_{c1} = I_{c1} \frac{d\omega_{c1}}{dt} \quad (7)$$

$$T_{c1m} - T_{sm} - (b_m + b_g) \omega_m = (I_m + I_g) \frac{d\omega_m}{dt} \quad (8)$$

$$T_{ms} - T_r - b_s \omega_s = I_s \frac{d\omega_s}{dt} \quad (9)$$

式中, T_i 为发动机输出转矩; T_{c1i} 为发动机传递给C1轴的转矩; T_{c1i} 为C1轴对发动机的反作用力矩; T_{mc1} 为m轴对C1的传递力矩; T_{c1m} 为C1轴对m轴的作用力矩; T_{sm} 为s轴对m轴的作用力矩; T_{ms} 为m轴对s轴的作用力矩; T_r 为车辆的阻力力矩; b_c 、 b_{c1} 、 b_m 、 b_g 、 b_s 分别为发动机输出轴、C1轴、m轴、单个齿轮和s轴的阻尼; ω_c 、 ω_{c1} 、 ω_m 、 ω_s 分别为发动机输出轴、C1轴、m轴和s轴的转动角速度; I_c 、 I_{c1} 、 I_m 、 I_g 、 I_s 分别为发动机输出轴、C1轴、m轴、单个齿轮和s轴的转动惯量。

杨伟斌等^[8]设计了如图2所示的DCT车辆的起步控制系统。在该控制系统中,要根据油门踏板开度 α 及其变化率 $d\alpha$ 得到驾驶员起步意图 I ,再根据发动机实际转速与目标转速的偏差 Δn 、发动机转速与离合器转速比 i_{cc} 以及 I 推导出离合器接合速度 V_c ,再通过升速换算(根据齿轮减速机构的速比和速度转换机构的半径)得到执行电机的目标转速 n_{mr} ,再通过执行电机控制系统使实际转速与目标转速保持一致,经过减速计算得到离合器的接合速度 V_c ,最后得到转速比 i_{cc} ,从而实现发动机实际转速与目标转速的偏差 Δn 的反馈控制。

2.2 目标测试参数确定

起步过程中车速不断变化,车辆起步速度影响车辆动力性能,将车辆起步速度作为DCT车辆起步品质评价中的一个测试参数。

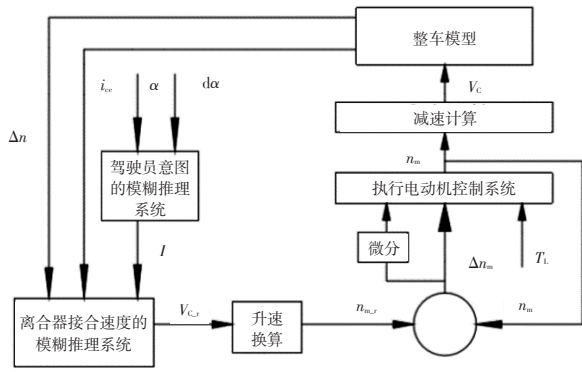


图2 DCT车辆的起步控制系统

驾驶员对油门踏板的踩踏程度导致加速度发生变化,冲击度表征了起步过程的舒适性,因此加速度是重要的目标测试参数。

在动力传递中,发动机转速影响输出轴转速和燃油消耗量。传动系的传动比是固定的,故不作为测定参数。

此外,速度、加速度、发动机转速均与时间相关,因此时间也是重要的测定参数。而滑磨功近似与时间成正比关系,因此也由时间作为测试参数进行表征。

综上,共确定速度、加速度、发动机转速和时间4个测定参数。

2.3 起步品质指标确定

赵治国等^[9]在研究DCT起步的鲁棒控制时,提出了离合器的2个性能评价指标,即冲击度和摩擦功,分别影响起步过程中的舒适性和离合器寿命。但是二者相互矛盾,本文的对象是汽车起步过程的品质,故优先考虑冲击度对起步过程的舒适性影响。

此外,车辆起步过程中其他参数的变化也要进行考虑。将从踩下油门踏板且车速为零的时刻到车速不为零的时刻记为起步响应延迟时间,将车辆速度刚不为零到起步结束的时间记为起步加速时间,二者为动力性相关参数,起步过程中的加速度峰值同样与动力性相关。

综合以上内容,如图3所示,本文考虑舒适性、动力性和经济性,选取了5个起步品质指标,分别为冲击度 \$J\$、起步响应延迟时间 \$t_{delay}\$、起步加速时间 \$t_A\$、起步加速度峰值 \$A\$ 以及发动机转速波动 \$\Delta n\$, 依次记为 \$Z_1 \sim Z_5\$。

3 起步品质评价体系的建立

3.1 评价指标综合权重确定

为排除主观因素的影响,选择变异系数法确定各指标的权重。

将 \$m\$ 次起步、\$n\$ 个评价指标数据组成的矩阵 \$\mathbf{F}\$ 经过区间法处理后,得到量纲归一化的样本矩阵,指标转换为

\$\mathbf{d}\$,在保留各指标值的排列信息时,实现符号的转变。在归一化处理后计算第 \$j\$ 个评价指标的变异系数 \$V_j\$:

$$V_j = \frac{\sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left(d_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_{ij} \right)^2}}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_{ij}} \quad (10)$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

最终计算出各指标的客观权重为:

$$w_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (11)$$

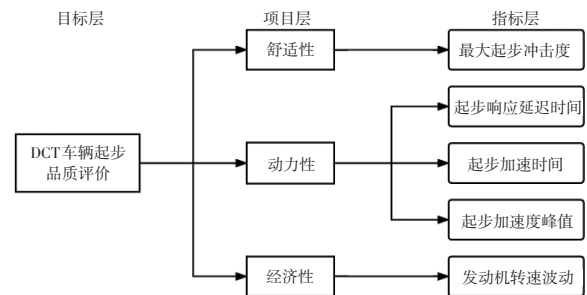


图3 DCT车辆的起步品质指标体系

3.2 起步品质与评价指标的关联度验证

采用灰色关联分析法对数据进行处理,得到各评价指标与起步品质的关联度并排序,再与各项指标的权重计算结果进行比对,验证权重计算结果的准确性与可靠性^[10-12]。

针对已经进行量纲归一化的样本矩阵 \$\mathbf{d}_i\$ 确定参考数列 \$d_0\$ 和比较数列 \$d_i\$,其中参考数列是反映系统行为特征的数据序列,比较数列是影响系统行为的因素组成的数据序列。通过计算各绝对插值数列 \$\Delta_i\$,组成绝对差值矩阵 \$\Delta_{ED}\$:

$$\Delta_i = |d_0 - d_i| \quad (12)$$

再计算出参考数列和比较数列第 \$j\$ 个评价指标的灰色关联系数 \$\eta(j)\$:

$$\eta(j) = \frac{\min_i \min_j |d_0(j) - d_i(j)| + \rho \max_j \max_i |d_0(j) - d_i(j)|}{|d_0(j) - d_i(j)| + \rho \max_j \max_i |d_0(j) - d_i(j)|} \quad (13)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

式中, \$\rho\$ 为分辨系数; \$d_0(j)\$、\$d_i(j)\$ 分别为参考数列、比较数列中第 \$j\$ 个评价指标。

在实际的灰色关联分析法应用中,除考虑关联度排序问题外,还要考虑关联度的分布区间,因为当关联度的分布区间很小时,即便得到了关联度大小的顺序,可能也因关联度之间的差异过小而导致序列间的相似性无法清楚地区别开来, \$\rho\$ 的取值会进一步影响关联度分布区间的长短,从而影响关联分析的结果,故必须选择合适的 \$\rho\$ 值。

关联系数表示比较数列与参考数列在各时刻的关联程度,所以不止一个,而信息过于分散不便于进行整体性比较,因此有必要求取各时刻关联系数的平均值,第j个评价指标的关联度r(j)可表示为:

$$r(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \eta(j) \quad (14)$$

最后,关联度按照大小进行排序,得到DCT车辆起步性能与各项评价指标的关联程度,与根据变异系数法计算所求得的权重进行对比,检验各项评价指标的重要程度是否一致。

3.3 隶属度函数

按照模糊数学理论^[13-14]对评价事物进行描述,这里选用五级制,如表1所示。

表1 DCT车辆起步品质各评价等级描述

起步品质	描述	评分/分	评分区间/分
优秀	起步迅速且平顺,舒适度高,经济性好,无冲击及抖动	9.0	[8.25, 10.00]
良好	起步较为迅速,舒适性较好,燃油消耗较低	7.5	[6.75, 8.25]
一般	起步速度一般,舒适性尚可,燃油消耗一般	6.0	[5.25, 6.75]
较差	起步速度较慢,舒适性较低,燃油消耗较多,经济性较低	4.5	[3.75, 5.25]
差	起步速度慢,舒适性低,经济性差	3.0	[0,3.75]

在变异系数及权重值确定后,要选择隶属度函数,该函数应合理覆盖整个劣化度取值的区间,本文选择岭形分布的隶属度函数,以描述各状态空间的模糊关系。根据各评价等级的隶属度函数进行运算:

$$I_1 = \begin{cases} 1, x \leq a_2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} \left(x - \frac{a_2 + a_3}{2} \right), a_2 < x \leq a_3 \\ 0, x > a_3 \end{cases} \quad (15)$$

$$I_2 = \begin{cases} 0, x \leq a_2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} \left(x - \frac{a_2 + a_3}{2} \right), a_2 < x \leq a_3 \\ 1, a_3 < x \leq a_4 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_5 - a_4} \left(x - \frac{a_4 + a_5}{2} \right), a_4 < x \leq a_5 \\ 0, x > a_5 \end{cases} \quad (16)$$

$$I_3 = \begin{cases} 0, x \leq a_4 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_5 - a_4} \left(x - \frac{a_4 + a_5}{2} \right), a_4 < x \leq a_5 \\ 1, a_5 < x \leq a_6 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_7 - a_6} \left(x - \frac{a_6 + a_7}{2} \right), a_6 < x \leq a_7 \\ 0, x > a_7 \end{cases} \quad (17)$$

$$I_4 = \begin{cases} 0, x \leq a_6 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_6 - a_7} \left(x - \frac{a_6 + a_7}{2} \right), a_6 < x \leq a_7 \\ 1, a_7 < x \leq a_8 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_9 - a_8} \left(x - \frac{a_8 + a_9}{2} \right), a_8 < x \leq a_9 \\ 0, x > a_9 \end{cases} \quad (18)$$

$$I_5 = \begin{cases} 0, x \leq a_8 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_9 - a_8} \left(x - \frac{a_8 + a_9}{2} \right), a_8 < x \leq a_9 \\ 0, x > a_9 \end{cases} \quad (19)$$

式中, $I_p \in [0,1]$ ($p=1,2,\dots,5$)为隶属于优秀、良好、一般、较差、差5个不同起步品质等级的概率; x 为归一化后的评价指标值; a_i 为起步品质评价指标模糊区间及界限。

通过隶属度函数的计算,可以得到第k个项目层因素中每项评价指标的状态空间 $\{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\}$ 的隶属度矩阵 R_k 为:

$$R_k = \begin{bmatrix} I_1(Z_1) & I_2(Z_1) & I_3(Z_1) & I_4(Z_1) & I_5(Z_1) \\ I_1(Z_2) & I_2(Z_2) & I_3(Z_2) & I_4(Z_2) & I_5(Z_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_1(Z_5) & I_2(Z_5) & I_3(Z_5) & I_4(Z_5) & I_5(Z_5) \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, $I_p(Z_j)$ 为第j个指标隶属于第p个起步品质等级的概率。

3.4 起步品质评价结果运算

根据各项指标权重 w_j 以及图3所示的项目层与指标层之间的关系,可以得到各指标层的权重 w'_k 。根据 R_k 和 w'_k 计算出该项目层综合状态的隶属度矩阵 B_k :

$$B_k = w'_k R_k \quad (21)$$

由表1得到评分量化向量 $S=[9.0, 7.5, 6.0, 4.5, 3.0]$ 、项目层隶属度矩阵 B 以及各项目层对应的权值向量 W ,计算起步品质的评分 F ,最后对照表1得到起步品质的评价:

$$F = WBS \quad (22)$$

4 试验验证

4.1 试验设计

试验车辆选用某款国内品牌装配有DCT变速器的紧凑型乘用车,选用专业驾驶员,对置于状况良好且平直路面(坡度为 $0 \pm 0.5\%$)上的试验车辆分别以10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%的油门踏板开度进行1挡起步操作。起步过程中,制定的数据采集方案拓扑如图4所示。

其中,车速和加速度使用SpeedBox Mini进行测量,发动机转速使用康明斯磁电式转速传感器测量,数据采

集方面,使用NI-9862 CAN采集卡进行采集,数采卡采集到的数据经过CompactDAQ-9132同步和整合后,采用与NI-9862匹配的LabVIEW软件存储数据。



图4 数据采集方案拓扑图

4.2 试验结果讨论

首先提取试验所得的行驶工况片段(起步过程区间定义为SpeedBox Mini中采集到的速度数据由0到达0.2 m/s),然后识别并处理外接传感器信号的异常值和缺失值,再对获取数据进行小波去噪滤波处理,得到起步过程评价指标结果,如表2所示。

表3所示为使用变异系数法计算出的各项指标的变异系数。表4所示为使用变异系数法得到的各项评价指标的客观权重。

表2 起步过程评价指标数据

编号	油门开度/%	$J/m \cdot s^{-3}$	t_{delay}/s	t_s/s	$A/m \cdot s^{-2}$	$\Delta n/r \cdot \min^{-1}$
Qibu1	10	0.334	0.66	3.30	0.104	34.5
Qibu2	35	0.456	0.56	1.25	0.154	6.5
Qibu3	15	0.292	0.16	2.05	0.107	5.0
Qibu4	20	0.654	0.56	1.70	0.125	45.5
Qibu5	40	0.533	0.76	1.15	0.162	39.5
Qibu6	40	0.567	0.71	1.00	0.161	40.5
Qibu7	25	0.562	0.76	1.60	0.135	48.5
Qibu8	30	0.516	0.66	1.55	0.146	28.0

表3 各指标的变异系数

指标	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
V_j	0.615 7	0.457 4	1.040 0	0.707 7	0.646 3

表4 各指标的客观权重

指标	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
β_j	0.177 6	0.131 9	0.300 0	0.204 1	0.186 4

表5所示为基于灰色关联法计算得到的各项评价指标关联系数。

表6所示为关联度的最终计算结果,由关联度数值可以看出 $r_{03} > r_{04} > r_{05} > r_{01} > r_{02}$,这表明在本次研究中5种因素与DCT车辆起步性能关联的排列顺序是:车辆起步加速时间、车辆起步加速度峰值、发动机转速波动、起步过程最大正向冲击度、起步响应延迟时间。

表5 关联系数计算结果

$\eta(1)$	$\eta(2)$	$\eta(3)$	$\eta(4)$	$\eta(5)$
0.438 4	0.107 1	0.090 9	0.090 9	0.128 5
0.180 6	0.130 4	0.479 2	0.420 3	0.743 6
1.000 0	1.000 0	0.179 7	0.095 4	1.000 0
0.090 9	0.130 4	0.247 3	0.130 7	0.097 0
0.130 4	0.090 9	0.605 3	1.000 0	0.112 0
0.116 3	0.098 4	1.000 0	0.853 2	0.109 2
0.118 2	0.090 9	0.277 1	0.176 8	0.090 9
0.139 1	0.107 1	0.294 9	0.266 0	0.159 1

表6 关联度计算结果

r_{01}	r_{02}	r_{03}	r_{04}	r_{05}
0.276 7	0.107 1	0.090 9	0.090 9	0.128 5

该结果与使用变异系数法计算的起步品质评价指标的客观权重的大小排序一致,证明了权重计算结果的准确性与可靠性。

表7所示为根据相应运算得到的各组起步数据的品质评价结果。

表7 起步品质评价结果

编号	评分/分	起步品质	编号	评分/分	起步品质
Qibu1	5.75	一般	Qibu5	5.41	一般
Qibu2	6.88	良好	Qibu6	5.33	一般
Qibu3	8.28	优秀	Qibu7	5.39	一般
Qibu4	5.12	一般	Qibu8	6.17	一般

对结果进行分析,可以看出大部分起步过程都处于一般状态,结合灰色关联分析法和模糊综合评判2种方法可以看出:在车辆起步过程中动力性的优劣是极为重要的,联系车辆起步时的实际操作,车辆起步过程中起步时间的长短、起步的快慢是最容易感受到的;而在舒适性和经济性方面,冲击度和发动机转速波动的细微差别均不易被感知。因此,在未来DCT车辆的起步研究中,可以着重关注起步的动力性,辅以舒适性和经济性。

5 结束语

本文通过对车辆起步控制机理进行研究,确定了冲击度、起步响应延迟时间、起步加速时间、起步加速度峰值以及发动机转速波动作为对DCT车辆起步品质评价的指标,通过灰色关联分析法,对各评价指标与起步品质的关联度大小进行排序,验证了权重计算结果的准确性与可靠性。最后,建立了起步品质评价体系,并基于模糊综合评价法构建出了起步品质评价模型并进行客观评分,实现了更加客观真实的起步品质评价。

参 考 文 献

- [1] WU G Q, LYU Z C, WANG C. Predictive Shift Strategy of Dual-Clutch Transmission for Driving Safety on the Curve Road Combined with an Electronic Map[J]. Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2023, 7(1).
- [2] 周维, 过学迅, 裴晓飞, 等. 动力总成驾驶性客观评价的工况优选方法与试验验证[J]. 汽车工程, 2021, 43(3): 358-363.
ZHOU W, GUO X X, PEI X F, et al. Optimum Condition Selection Method and Test Verification for Objective Evaluation of Powertrain Drivability[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(3): 358-363.
- [3] MIN G, SON H, SONG M, et al. Development of A Gear Fork Control Algorithm to Improve the Shift Quality of A Dual-Clutch Transmission[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(11): 1477-1487.
- [4] 罗勇, 韦永恒, 黄欢, 等. 基于驾驶员意图识别的P2.5插混构型双离合起步控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(5): 1575-1582.
LUO Y, WEI Y H, HUANG H, et al. Starting Control of P2.5 Plug-in Hybrid Configuration Dual-Clutch Based on Driver's Intention Recognition[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(5): 1575-1582.
- [5] 张迪, 田晋跃, 姚金煜, 等. 基于灰色关联分析法的变速器换挡特性评价[J]. 汽车技术, 2015(11): 39-43.
ZHANG D, TIAN J Y, YAO J Y, et al. Evaluation of Shift Characteristics of Transmission Based on Grey Relational Analysis[J]. Automobile Technology, 2015(11): 39-43.
- [6] LEI Y L, LIU H B, QIU J, et al. Starting Quality Assessment and Optimization for Automated Manual Transmission[C]// SAE 2012 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE, 2012.
- [7] 许浩浩. 基于 MATLAB/Simulink 的 DCT 起步与换挡仿真研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
XU H H. Simulation Research on Starting and Shifting of DCT Based on MATLAB/Simulink[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [8] 杨伟斌, 陈全世, 吴光强, 等. 双离合器式自动变速器起步的智能控制及性能仿真[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 178-185.
YANG W B, CHEN Q S, WU G Q, et al. The Starting Control Strategy for Dual Clutch Transmission Based on Intelligent Control and the Performance Simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 178-185.
- [9] 赵治国, 仇江海. DCT 车辆起步及换挡过程双离合 H_∞ 鲁棒控制[J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 745-751.
ZHAO Z G, QIU J H. H_∞ Robust Control for Twin Clutches of DCT during Vehicle's Starting and Shifting Processes[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(6): 745-751.
- [10] 魏子茹, 卢延辉, 王鹏宇, 等. 基于 CRITIC 法的灰色关联理论在无人驾驶车辆测试评价中的应用[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 99-108.
WEI Z R, LU Y H, WANG P Y, et al. Application of Grey Correlation Theory Based on CRITIC Method in Autonomous Vehicles Test and Evaluation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 99-108.
- [11] WANG R, YANG F X, QU G M. Prediction Model of Agricultural Non-Point Source Water Pollution Based on Grey Correlation Method[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2021, 20(2): 633-641.
- [12] 辜志强, 王朝阳. 商用车侧翻的灰色-马尔科夫链预测方法研究[J]. 汽车技术, 2022(3): 42-48.
GU Z Q, WANG C Y. Research on Grey-Markov Chain Prediction Method of Commercial Vehicle Rollover[J]. Automobile Technology, 2022(3): 42-48.
- [13] ZHAO H Y, ZHANG J G, LIANG S S, et al. Evaluation of Surrounding Rock Quality of Tunnels Using a Combined Method of Weighted Norms Based Grey Relational Analysis and Fuzzy Mathematics Theory[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 41(1).
- [14] WU Y N, ZHANG T. Risk Assessment of Offshore Wave-Wind-Solar-Compressed Air Energy Storage Power Plant Through Fuzzy Comprehensive Evaluation Model[J]. Energy, 2021, 223.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2022年11月16日。