

DOI:10.11918/202011086

基于粗糙集理论的双离合器自动变速器 车辆换挡品质评价指标约简

刘海江, 邢 证

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘 要: 针对 DCT (dual clutch transmission, 双离合自动变速器) 车辆换挡品质客观评价, 首先建立了 DCT 车辆换挡动力学模型, 从体现车辆换挡品质平顺性和动力性两个评价维度, 初步选取 10 个参数作为换挡品质评价指标; 为了解决随着指标数量增长带来的指标之间存在冗余, 以及现有换挡品质评价指标权重确定方法缺乏合理性的问题, 在初选的评价指标基础之上, 利用遗传算法优化的粗糙集知识约简方法对评价指标进行约简, 并利用支持向量机分类模型对约简有效性进行验证; 接着基于属性重要度的概念对约简后评价指标进行赋权。试验结果表明, 该方法可以有效地删除冗余指标, 同时对评价指标进行合理赋权, 为 DCT 车辆换挡品质客观评价提供了基础。

关键词: 双离合自动变速器; 换挡品质; 粗糙集; 知识约简; 权重

中图分类号: U461.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)07-0164-07

Research on reduction of shift quality evaluation index for dual clutch automatic transmission vehicle based on rough set theory

LIU Haijiang, XING Zheng

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at the objective evaluation of shift quality of DCT (dual clutch transmission) vehicles, 10 parameters are selected as the evaluation indexes of shifting quality from two evaluation dimensions of smoothness and power performance. In order to solve the problems of redundancy between indicators and the lack of rationality of the existing weighting methods, based on the primary evaluation indicators, the evaluation indicators are reduced by using the rough set knowledge reduction method optimized by genetic algorithm, and the effectiveness of the reduction is verified by using the classification model of support vector machine. Then, based on the concept of attribute importance, the reduced evaluation index is weighted. The test results show that the method can effectively delete redundant indicators, and reasonably weight the evaluation indexes, which provides a basis for objective evaluation of shift quality of DCT vehicles.

Keywords: dual clutch transmission; shift quality; rough set theory; weight

在对 DCT 车辆换挡品质进行客观评价时, 合适的评价指标是其基础, 没有一套可信的、科学的指标就无法得出合理的评价结果。目前, 在 DCT 车辆换挡品质评价指标方面已有较多的研究。宋世欣等^[1]从控制的角度出发, 以结合转速波动量等 10 个参数作为换挡舒适性与使用寿命的评价指标, 最后以 AHP 法确定指标权重。褚天争^[2]以烦恼度、冲击度、换挡响应时间等 11 个指标作为换挡品质评价指标, 并使用相关性分析精简指标。孙亚斌^[3]以换挡时间、冲击度、加速度振动量等 9 个指标作为 DCT 车辆换挡动力性、使用寿命和舒适性评价指标, 并通过熵权法确定了各个指标权重。王会义^[4]以冲击

度幅值和均方根值作为换挡舒适性评价指标, 并进行了试验验证。国外研究中, Chalmers University of Technology 课题组^[5-6]对汽车换挡过程中的低频振荡现象进行了深入的研究, 利用振动剂量值 VDV 对换挡舒适性进行量化评价。AVL 公司基于神经网络构建了车辆各个工况评价模型, 模型采用车辆纵向加速度、冲击度、换挡时间等指标作为神经网络的输入, 输出为车辆该工况下的评分。Volvo 公司^[7]采用车辆纵向加速度峰值、冲击度峰值等 4 个客观参数以及驾驶员的主观评价值作为换挡品质指标, 从客观数据和主观得分来反映换挡过程的平稳性。

以上文献对 DCT 车辆换挡品质的各个方面进行较为全面的研究, 但普遍存在着以下问题: 指标数目较多, 可能包含大量冗余信息, 从而增加评价工作的复杂度与评价结果的可信度。另一方面, 对于指

收稿日期: 2020-11-18

基金项目: 基金项目类别 (U1764259)

作者简介: 刘海江 (1967—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 邢 证, 1930191@tongji.edu.cn

标权重的确定,现有的研究采用基于专家知识的主观赋权法或者基于数据的客观赋权法,前者需要专家对指标的重要度进行打分从而忽略了数据本身包含的信息,后者则没有考虑评价主体的知识与经验。

针对以上问题,本文提出了一种基于粗糙集理论的 DCT 车辆换挡品质评价指标约简与赋权方法。该方法利用遗传算法优化的粗糙集知识约简方法对初选指标进行约简,同时基于属性重要度的概念确定约简后指标的权重。最后通过整车试验验证了该方法的可行性和合理性,为 DCT 车辆换挡品质评价及优化奠定了基础。

1 DCT 车辆换挡品质指标体系构建步骤与指标初选

1.1 DCT 车辆换挡品质指标体系构建步骤

指标体系的建立过程是一个由具体到抽象再到具体的思维过程,在这一过程中评价者对评价目标和评价对象的认识逐渐深入、完善、系统化^[8]。遵循以上原则,首先建立了 DCT 车辆换挡动力学模型,之后结合模型从换挡的动力性与平顺性角度出发完成对换挡品质指标集 C 的初选,在此基础上结合专家知识 D 并利用遗传知识约简算法删除冗余指标,得到约简后的指标集 R ,最后基于属性重要度的概念确定评价指标权重 W ,完成指标体系的建立。其过程如图 1 所示。



图 1 指标体系构建步骤

Fig.1 Construction steps of index system

1.2 DCT 车辆换挡动力学模型

DCT 车辆传动系统是个多自由度的复杂系统,假设各个部件都以集中质量的形式,对 DCT 车辆传动系统的建模如图 2 所示^[9]。

图 2 中: T_e 为发动机输出扭矩; I_e 为发动机曲轴、飞轮及离合器主动部分的转动惯量; ω_e 为发动机输出转速; T_{11} 、 T_{21} 为离合器 C1、C2 输入轴反作用扭矩; T_{c1} 、 T_{c2} 为离合器 C1、C2 传递扭矩; ω_{c1} 、 ω_{c2} 为离合器 C1、C2 输出轴转速; I_{c1} 、 I_{c2} 为离合器 C1、C2 输出轴转动惯量; T_{12} 、 T_{22} 为离合器 C1、C2 输出轴反作用扭矩; 离合器 C1 输出轴连接奇数档和倒档,离合器 C2 连接偶数档,其中 i_1 、 i_2 为奇数档、偶数档各个挡位传动比; T_{v1} 、 T_{v2} 传动轴 1、2 传递扭矩; ω_{v1} 、 ω_{v2} 传动轴 1、2 转速; T_v 为变速器输出扭矩; ω_v 为变速器输出转速; T_f 车辆总阻力矩。

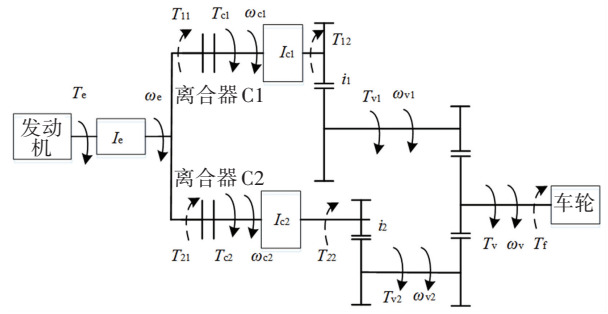


图 2 DCT 车辆传动系统动力学模型

Fig.2 Dynamic model of DCT vehicle transmission system

以湿式离合器为例,在换挡过程中自动变速箱控制单元通过控制离合器 C1、C2 的结合油压间接控制其结合或者分离,配合换挡机构完成挡位的切换。以 1 升 2 档为例,其过程可以分为 4 个阶段:低挡运行阶段、转矩相、惯性相以及高档运行阶段。

低挡运行阶段:低档位运行阶段时车辆位于 1 档,离合器 C1 处于结合状态,C2 处于分离状态。此时,发动机扭矩全部经过离合器 C1 输出,整车处于一个稳定的工作状态。该阶段的动力学方程描述如下:

$$\begin{cases} (I_e + I_{c1})\dot{\omega}_e = T_e - T_{12} \\ I_{c2}\dot{\omega}_{c2} = T_{22} \end{cases} \quad (1)$$

转矩相:在转矩相阶段,离合器 C1 主从动盘之间的压紧力降低,但仍旧处于结合状态;离合器 C2 主从动盘之间的压紧力上升,其处于滑摩状态。离合器 C1 和 C2 同时参与发动机扭矩的分配。

$$\begin{cases} (I_e + I_{c1})\dot{\omega}_e = T_e - T_{12} - T_{21} \\ I_{c2}\dot{\omega}_{c2} = T_{c2} + T_{22} \end{cases} \quad (2)$$

惯性相:在惯性相阶段,离合器 C1 主从动盘之间的压紧力持续降低,进入滑摩状态;离合器 C2 主从动盘之间的压紧力不足,仍处于滑摩状态。此时,发动机输出扭矩与离合器传递扭矩之间不一定能够匹配,可能会产生较大的冲击。该过程下动力学方程为

$$\begin{cases} I_e\dot{\omega}_e = T_e + T_{11} - T_{21} \\ I_{c1}\dot{\omega}_{c1} = T_{12} - T_{c1} \\ I_{c2}\dot{\omega}_{c2} = T_{c2} - T_{22} \end{cases} \quad (3)$$

高档运行阶段:在高档运行阶段,离合器 C1 主从动盘之间完全分离,离合器 C2 完全结合。发动机扭矩全部经过离合器 C2 输出,整车位于 2 档行驶并重新回归稳定状态。

$$\begin{cases} (I_e + I_{c2})\dot{\omega}_e = T_e - T_{22} \\ I_{c1}\dot{\omega}_{c1} = T_{12} \end{cases} \quad (4)$$

1.3 DCT 车辆换挡品质评价指标的初选

换挡品质的含义是在保证汽车传动系耐久性和

整车的动力性的前提下,实现换挡过程的平顺无冲击^[10]。换挡品质在整车层面的表现会影响驾乘人员的主观感受,从而影响到消费者的购买意愿。当换挡品质较差时会出现以下现象:换挡响应慢持续时间长,驾驶员的动力性需求得不到满足;在换挡过程中,离合器 C1、C2 结合参数控制不合理导致的整车纵向抖动大、冲击与噪声明显,恶化驾乘人员的舒适感。因此确定从换挡平顺性和动力性 2 个评价维度出发对换挡品质进行评价,并初选了 10 个与之相关的参数作为初选指标集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{10}\}$ 。按照 $c_1 \sim c_{10}$ 的顺序,各个指标的物理含义如下。

1.3.1 与时间及发动机转速相关的指标 $c_1 \sim c_5$ (图 3)

1) 换挡时间 t_s/s 。当车辆在某挡位稳定行驶时,其总传动比的变化率为 0。因此将换挡时间 t_s 定义为一次换挡过程中,总传动比变化率两次不为 0 时中间经历时间。换挡时间可用来衡量换挡过程的动力性,换挡时间越长动力性评价越差。

2) 换挡响应时间 t_d/s 。换挡响应时间 t_d 表示一次换挡过程中,从需求挡位发生变化到总传动比变化率发生改变所经历的时间。换挡响应时间越长,换挡动力性评价越差。

3) 发动机转速变化率 $\dot{\omega}_{\max}/(r \cdot \min^{-1} \cdot s^{-1})$ 。发动机转速变化率 $\dot{\omega}_{\max}$ 定义为:惯性相中,发动机转速对时间一阶导数绝对值的最大值。发动机转速变化率越大,换挡过程的冲击越大,车辆换挡平顺性越低。

4) 离合器分离转速超调 $\Delta\omega_{\text{sep}}/(r \cdot \min^{-1})$ 。在换挡过程中,由于离合器的分离使得发动机负载减少,从而导致的发动机转速瞬间变大产生超调。离合器分离转速超调越大换挡噪声与发动机轰响也就越大,换挡平顺性评价也就越差。

5) 离合器结合转速超调 $\Delta\omega_{\text{com}}/(r \cdot \min^{-1})$ 。在离合器结合过程中,离合器从动盘与发动机转速逐渐接近,此时会引起发动机转速的波动。离合器结合转速超调越大说明换挡结束时发动机转速波动越大,换挡平顺性也就越差。

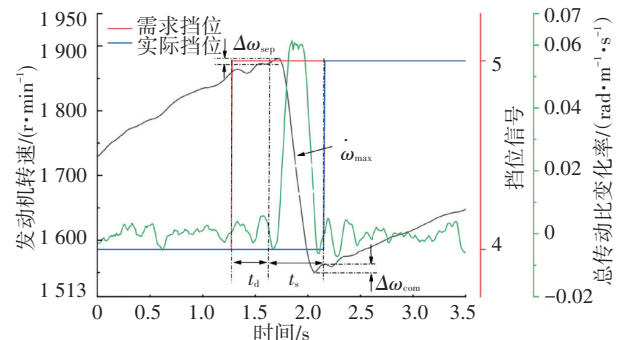


图 3 与时间及发动机转速相关的评价指标

Fig.3 Evaluation indexes related to time and engine speed

1.3.2 与车辆纵向加速度相关的指标 $c_6 \sim c_{10}$ (图 4)

1) 离合器结合加速度幅值 $\Delta a_{\text{com}}/(m \cdot s^{-2})$ 。离合器结合加速度幅值 Δa_{com} 是指离合器结合阶段车辆纵向加速度最大值与最小值之差。该值越大则换挡平顺性越差,主观评价越低。

2) 加速度振荡 $\Delta a/(m \cdot s^{-2})$ 。加速度振荡 Δa 为换挡结束之后车辆纵向加速度曲线连续 3 个波峰与波谷之间高度的和,该值反映了离合器结合之后车辆的耸动情况。加速度振荡越大说明耸车越严重,平顺性也就越差。

3) 加速度均方根值 $a_{\text{rms}}/(m \cdot s^{-2})$ 。在换挡时间 t_s 内,车辆纵向加速度的均方根值可以用来衡量换挡过程中加速度的波动情况,该值越大说明换挡过程中加速度波动越大,平顺性也就越差。

4) 负向冲击度 $J_{\text{neg}}/(m \cdot s^{-3})$ 。负向冲击度 J_{neg} 表示换挡时间 t_s 内,车辆纵向加速度对时间一阶导数的最小值。负向冲击度越小,驾驶员的前倾感越强,换挡平顺性越差。

5) 正向冲击度 $J_{\text{pos}}/(m \cdot s^{-3})$ 。正向冲击度 J_{pos} 表示在换挡时间 t_s 内,车辆纵向加速度对时间的一阶导数的最大值。正向冲击度越大,驾驶员的后仰感越强,换挡平顺性越差。

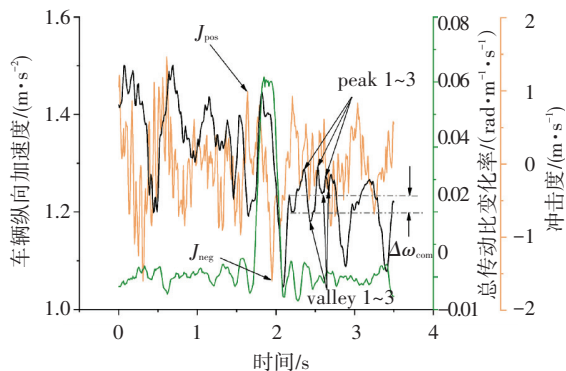


图 4 与车辆纵向加速度相关的评价指标

Fig. 4 Evaluation indexes related to vehicle longitudinal acceleration

2 基于粗糙集理论的指标约简及权重模型

2.1 粗糙集理论

粗糙集理论在 1982 年由波兰数学家 Pawlak.Z 提出,是一种可以处理不完备和不确定信息的数学工具^[11-12]。目前粗糙集理论已经被应用到机器学习、数据挖掘、知识发现等多个领域。

定义 1:信息系统。

定义 $S = (U, A, V, f)$ 是一个信息系统,或称之为知识表达系统。其中 U 为论域、 A 为属性集、 V 为

属性 A 的值域集 f 为信息函数。令 C 为条件属性, D 为决策属性, 则有 $A = C \cup D$ 且 $C \cap D = \emptyset$ 。同时定义条件属性 C 和决策属性 D 组成的系统称为决策表。

定义 2: 不可分辨关系。

设 R 为任意一个非空属性集合, 即 $R \subseteq A$ 且 $R \neq \emptyset$, 定义不可分辨关系 $IND(R)$ 为

$$IND(R) = \{(x, y) \in U \times U \mid \forall a \in R, f(x, a) = f(y, a)\} \quad (5)$$

定义 3: 上下近似集。

为了定义知识的近似程度, 粗糙集理论引入下近似集的概念。下近似集 $R(X)$ 定义为 U 中所有必定属于集合 X 的对象的集合, 即

$$R(X) = \{x \mid [x]_R \subseteq X\} \quad (6)$$

同时, 定义上近似集 $\bar{R}(X)$ 为 U 中所有必定属于和可能属于集合 X 的对象的集合, 即

$$\bar{R}(X) = \{x \mid [x]_R \cap X \neq \emptyset\} \quad (7)$$

其中, X 的 R 下近似集也称为正域记作 $pos_R(X)$ 。

定义 4: 条件属性对决策属性的支持度。

令 C 为条件属性, D 为决策属性, 且 $A = C \cup D$, $C \cap D = \emptyset$ 。定义条件属性 C 对决策属性 D 的支持度 $\gamma_c(D)$ 表示为

$$\gamma_c(D) = \frac{\text{card}(\text{pos}_c(D))}{\text{card}(U)} \quad (8)$$

式中, $\text{card}(\ast)$ 表示集合的基。由定义可知 $0 \leq \gamma_c(D) \leq 1$, 当 $\gamma_c(D) = 1$ 表示决策属性完全由条件属性决定, 当 $0 < \gamma_c(D) < 1$ 时表示决策属性部分决定于条件属性, $\gamma_c(D) = 0$ 则称决策属性完全独立于条件属性。

定义 5: 条件属性对决策属性的重要度。

定义条件属性的子集 C_i 对于决策属性 D 的重要度为

$$\text{Sig}_D(C_i) = \gamma_c(D) - \gamma_{c-c_i}(D), C_i \subseteq C \quad (9)$$

定义 6: 知识约简。

知识约简是粗糙集理论中的核心部分。知识约简就是对信息系统中规则的抽取的过程, 通常包括属性约简和属性值约简两部分^[13], 本研究只涉及属性约简。设 $S = (U, A, V, f)$ 是一个信息系统, $R \subseteq C$, 若有 $\gamma_c(D) = \gamma_R(D)$, 且不存在 $P \subseteq R$ 使得 $\gamma_c(D) = \gamma_P(D)$, 则称 R 为 C 相对于 D 的一个相对约简。

2.2 遗传知识约简算法

由于知识约简已经被证明属于 NP-hard 问题^[14], 而遗传算法作为一种启发式优化算法具有高

效、隐含并行及全局性的特点, 因此适用于粗糙集知识约简问题。遗传算法的基本原理已经有较多文献涉及, 本小节仅就与粗糙集知识约简相关的步骤进行论述。

2.2.1 染色体编码方法

设条件属性集合 C 有 n 个元素, 对应 n 个条件属性, 即有 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 。使用 n 位二进制染色体 r 来对每个条件属性进行编码。其中二进制码“0”表示在染色体 r 中不包含对应的条件属性, “1”则相反。

2.2.2 适应度函数设计

适应度函数用来评判不同个体的优劣程度, 控制着不同个体的遗传行为。适应度函数一般由目标函数变换而来, 其应满足非负的特点。本研究中约简效果的评判标准有两个。

1) 约简掉的条件属性个数 $n_s^{(r)}$, 对应染色体 r 中“0”的个数。从指标体系的精简程度来看, 约简掉的条件属性越多越好, 即 $n_s^{(r)}$ 越大越好。

2) 约简后条件属性对决策属性的支持度 $\gamma_c^{(r)}(D)$, 对应染色体 r 中编码为“1”的条件属性对决策属性的支持度。从指标体系的完备程度来看, 决策属性应该尽可能完全由条件属性决定, 即 $\gamma_c^{(r)}(D)$ 越大越好。

经过上述分析, 设目标函数为 $\max\{n_s^{(r)} + \gamma_c^{(r)}(D)\}$, 同时由粗糙集理论知识可知 $0 \leq n_s^{(r)} \leq n, 0 \leq \gamma_c(D) \leq 1$, 所以 $n_s^{(r)}$ 和 $\gamma_c^{(r)}(D)$ 对目标函数的权重并不相同。因此将 $n_s^{(r)}$ 值域映射到和 $\gamma_c^{(r)}(D)$ 值域相同的范围内, 并引入平衡系数 α 来构造染色体 r 的适应度函数 F_r :

$$F_r = \alpha \cdot \frac{n_s^{(r)}}{n} + (1 - \alpha) \cdot \gamma_c^{(r)}(D), \alpha \in [0, 1] \quad (10)$$

2.2.3 遗传、交叉及变异算子的选择

在遗传算子的选择方面, 采用锦标赛的策略进行选择, 即从上一代种群中任意挑选一组个体, 并将这组个体中适应度最优的个体纳入到下一代种群中去, 重复挑选直到下一代种群数目满足设定值。交叉算子采用单点交叉, 该算子以概率 P_c 在染色体中随机的一处交叉点互换 2 个个体的基因。变异算子采用均匀变异, 该算子以概率 P_m 随机反转某位基因的二进制码。

2.2.4 遗传知识约简步骤

设置算法终止条件为总遗传代数达到 T_0 或者连续 T 代适应度函数值不再变化, 遗传知识约简算法伪代码如表 1 所示。

表 1 遗传知识约简算法

Tab. 1 Knowledge reduction of genetic algorithm	
算法	遗传知识约简算法
输入	$S = (U, A, V, f), P_m, P_c, T, T_0$
输出	约简后的条件属性集合 R
1:	$t \leftarrow 0$ //种群代数 t
2:	初始化种群 $P(t)$
3:	while 不满足终止条件 do
4:	将选择算子作用于 $P(t)$;
5:	将选择交叉作用于 $P(t)$;
6:	将选择变异作用于 $P(t)$;
7:	计算 $P(t)$ 中各个个体的适应度函数 F_r ;
8:	$t \leftarrow t + 1$;
9:	end while

2.3 基于属性重要度的定权法

对于一个信息系统 $S = (U, A, V, f)$ 来讲, 一个属性的重要度体现在去掉该属性时知识库分类的变化程度^[15]。变化程度越大说明该属性重要度越大。基于以上思路, 可以通过属性的重要程度来衡量指标的权重。

设 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 为经过约简后的指标集合, D 为决策属性。指标 r_i 对于决策属性 D 的重要度为

$$\text{Sig}_D(r_i) = \gamma_R(D) - \gamma_{R-r_i}(D), i = 1, 2, \dots, m$$

(11)

对指标重要度进行归一化处理, 定义指标 r_i 的权重 w_i 为

$$w_i = \frac{\text{Sig}_D(r_i)}{\sum_{i=1}^m \text{Sig}_D(r_i)}, i = 1, 2, \dots, m$$

(12)

3 试验验证

3.1 试验数据的获取

实验车辆选用装配有 DCT 的国内某款乘用车, 以该车辆 4 档升 5 档不同油门开度为试验工况。试验数据采集于整车 CAN 信号及外接速度、加速度传感器。试验数据经过片段截取、预处理后提取换挡品质评价指标。同时为了获得不同油门开度下换挡品质评价分数, 邀请 5 位专业整车主观评价人员对换挡过程进行独立打分, 评分方式借鉴于 SAEJ1060 十分制, 最终以 5 位主观评分师加权平均值作为最终换挡品质的主观评分。

3.2 换挡品质指标约简

以 10 个初选指标作为条件属性集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{10}\}$, 整车主观评价人员打分作为决策属性

$D = \{d_1\}$, 16 组换挡样本作为原始数据。首先, 通过平均相关系数 r_c 衡量指标体系的冗余度:

$$r_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |r_{ij}| - n}{n^2 - n}$$

(13)

式中, r_{ij} 为指标体系相关系数矩阵第 i 行 j 列的元素, n 为指标数量。通常情况下平均相关系数 $0 \leq r_c \leq 1$, 且越接近 1 表示当前指标体系的冗余度越大。由于实际整车系统的复杂性, 指标间之间完全独立是不可能的, 一般认为当 $R_c \leq 0.5$ 时指标之间相关度较低^[16]。计算 10 个初选指标之间的平均相关系数 $r_c = 0.534\ 9$, 说明指标之间存在交多的冗余信息, 应该进行指标约简。

由于粗糙集工具只适用于离散数据, 所以还需对原始指标值进行离散化处理。首先通过 Min-max 规范化处理将相同属性的数据线性映射到 0-1 范围内, 接着由 Sturges 经验公式确定分组数, 最终通过一维 K-means 算法聚类后得到如表 2 所示的决策表。其中, 按照聚类簇中心值从小到大的顺序将各个簇中的成员赋予标签 1、2、3、4。

表 2 换挡品质决策表

Tab.2 Shift quality decision table											
U	C										D
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	
1	2	2	4	1	1	1	1	1	4	1	1
2	2	2	4	1	2	1	1	1	4	1	1
3	2	2	4	1	1	1	1	2	4	1	1
4	3	3	4	1	1	1	1	2	4	1	1
5	2	1	3	1	1	1	1	3	4	1	3
6	4	1	3	1	1	1	1	3	3	1	2
7	2	1	3	1	1	1	1	3	4	1	3
8	1	1	2	1	1	2	2	4	3	1	3
9	1	2	3	1	4	1	1	2	4	2	1
10	1	4	3	1	4	2	2	3	3	1	2
11	1	1	3	1	3	2	2	3	3	2	3
12	1	1	2	1	1	2	2	3	3	2	3
13	1	2	2	1	3	3	4	4	1	3	3
14	1	2	2	1	3	2	3	4	1	3	4
15	1	1	1	4	4	4	4	4	2	4	4
16	1	1	1	4	1	3	2	3	2	3	4

按照本文的算法对换挡品质决策表进行约简。令适应度函数 F_r 中平衡系数 $\alpha = 0.5$, 并设置种群中个体总数为 100、 $P_m = 0.01$ 、 $P_c = 0.8$ 、 $T = 20$ 、 $T_0 = 200$ 。经过计算得到最优个体的染色体 r 为“0100001010”、 $n_s^{(r)} = 7$ 、 $\gamma_c^{(r)}(D) = 1$ 。

由 $n_s^{(r)} = 7$ 、染色体编码为“0100001010”可知, 遗传知识约简算法约简掉了 7 个冗余指标从而只保留了 3 个指标 $\{c_2, c_7, c_9\}$ 。其中, c_2 为换挡响应时间 t_d 、 c_7 为加速度振荡 Δa 、 c_9 为负向冲击度 J_{neg} 。且由 $\gamma_C^{(r)}(D) = 1$ 说明精简后的这 3 个指标对评价结论的支持度为 1, 即本试验中主观人员的评价结论完全由这 3 个指标决定。并设约简后的指标集合 $R = \{c_2, c_7, c_9\} = \{r_1, r_2, r_3\}$ 。

3.3 指标约简有效性验证

首先计算约简后指标集合 R 的平均相关系数 $r_R = 0.442\ 6$, 对比 $r_C = 0.534\ 9$ 说明约简算法在数理统计意义上消除了部分冗余信息, 降低了指标体系内的冗余。

考虑到粗糙集知识约简是在保持原有知识库中的分类能力不变的情况下删除冗余属性^[17], 因此还需对数据的分类能力进行验证。分别使用约简前指标集合 C 、约简后指标集合 R 对评价结果 D 进行分类预测。如果使用集合 R 的预测准确率优于或者等于使用集合 C 的, 则说明约简算法在保持原有知识分类能力下约简掉了一些冗余不相关的属性, 即约简模型是有效的。

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 作为一种有监督的机器学习算法, 通过核函数将低维线性不可分问题映射到高维空间内变换为线性可分问题, 因此 SVM 具有较高的预测准确率, 尤其是在面对样本特征数目比较多而样本数目偏少的数据集时。为了验证约简有效性, 分别使用线性、三次多项式、高斯核函数 SVM 分类模型对决策属性进行 10 折交叉训练验证, 计算分类准确率。不同类型的核函数 SVM 分类模型分类准确率如图 5 所示。

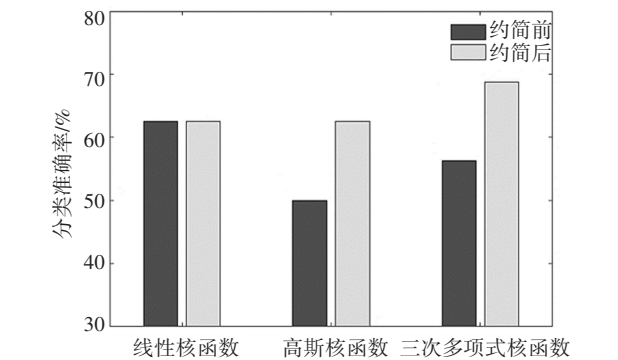


图 5 SVM 分类准确率

Fig.5 Classification accuracy of SVM

SVM 分类模型分类准确率显示, 约简后的指标集合对评价结果的预测效果普遍较好。其中, 基于高斯核函数的 SVM 分类模型准确率提升最大, 相对于使用未约简的指标集合准确率上升了 25%。SVM 分类模型验证结果说明, 遗传知识约简算法可以在

保证知识分类能力的前提下删除冗余指标, 保留了 3 个可以表征当前工况下评价人员主观感受的核心品质指标: 换挡响应时间 t_d 、加速度振荡 Δa 、负向冲击度 J_{neg} , 提升了 DCT 车辆换挡品质评价指标体系的合理性。同时, 对比目前整车厂通过换挡时间、冲击度、换挡后车辆纵向加速度线性程度这 3 个指标来衡量换挡品质, 说明遗传约简算法的约简结果不但与实际工程经验较为吻合, 而且可以有效地将评价主体的经验认识和整车客观试验数据结合起来挖掘出新的核心指标。

3.4 指标权重分析

由公式 (11) 和 (12) 计算换挡响应时间 t_d 、加速度振荡 Δa 、负向冲击度 J_{neg} 的属性重要度和权重, 如表 3 所示。

表 3 属性重要度与指标权重

Tab.3 Attribute importance and index weight		
指标	属性重要度 $Sig_D(r_i)$	权重 w_i
换挡响应时间 t_d	0.312 5	0.208 3
负向冲击度 J_{neg}	0.562 5	0.375 0
加速度振荡 Δa	0.625 0	0.416 7

由表 3 可以看出, 加速度振荡 Δa 权值最大, 负向冲击度 J_{neg} 其次, 换挡响应时间 t_d 最小。指标权重排序反映出在当前试验工况下, 加速度振荡对驾驶员主观感受的影响最大、换挡响应时间最小, 为 DCT 车辆换挡品质控制优化及评价提供了参考依据。

4 结 论

1) 本文从 DCT 车辆换挡平顺性和动力性 2 个评价维度出发, 初步选取了以换挡时间 t_s 、换挡响应时间 t_d 、负向冲击度 J_{neg} 、加速度振荡 Δa 等 10 个参数作为 DCT 车辆换挡品质评价指标。

2) 基于遗传知识约简算法对初选指标进行指标约简, 得到了以换挡响应时间 t_d 、负向冲击度 J_{neg} 、加速度振荡 Δa 作为 DCT 车辆 4 升 5 档工况下换挡品质评价核心指标。通过对比 3 种核函数 SVM 分类模型在约简前后的分类准确率, 实现了对约简结果进行合理性验证。结果表明, 遗传知识约简算法可以有效挖掘主要品质指标, 提升指标的合理性。

3) 使用基于属性重要度的定权法确定了 4 升 5 档工况下换挡品质评价指标权重, 最终建立了该工况下的 DCT 车辆换挡品质评价指标体系。

参考文献

[1] 宋世欣, 张元侠, 刘科, 等. 双离合自动变速器控制品质评价

- 指标分析[J]. 汽车工程, 2015, 37(8): 925
- SONG Shixin, ZHANG Yuanxia, LIU Ke, et al. An analysis on the evaluation metrics of control quality for vehicles with dual clutch transmission [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(8): 925
- [2] 褚天争. DCT 换挡品质主客观评价一致性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020
- CHU Tianzheng. Research on the consistency of subjective and objective evaluation for DCT shift quality[D]. Changchun: Jilin University, 2020
- [3] 孙亚斌. 双离合自动变速器换挡品质评价方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017
- SUN Yabin. Study on the evaluation method of shift quality for the DCT [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017
- [4] HUANG Qunan, WANG Huiyi. Fundamental study of jerk evaluation of shift quality and ride comfort [C]//SAE Automotive Dynamics, Stability & Controls Conference and Exhibition. Detroit: SAE, 2004
- [5] JOHANSSON S, LANGJORD E, PETTERSSON S. Objective evaluation of shunt and shuffle in vehicle powertrains [C]//7th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Arnhem: [s.n.], 2004
- [6] PERSSON J. Integrated powertrain control—a literature survey on longitudinal vibrations, drivability aspects and future challenges [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2004
- [7] SCHNETZLER S, PETTERSSON J, MURTONEN P. Quality assurance of driver comfort for automatic transmissions [C]//SAE 2000 World Congress. Detroit: SAE, 2000
- [8] 李远远. 基于粗糙集的指标体系构建及综合评价方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009
- LI Yuanyuan. Research on the construction of indicator system and comprehensive evaluation method based on rough set [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009
- [9] 付尧. 基于客观评价的双离合器自动变速器换挡控制技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015
- FU Yao. Research on gearshift control for dual clutch transmission based on objective evaluation [D]. Changchun: Jilin University, 2020
- [10] 孙迎波. 六速 DCT 换挡模型及换挡品质评价体系研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015
- SUN Yingbo. Study on shift models and evaluation system of shift quality for the six speed DCT [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015
- [11] PAWLAK Z. Rough sets [J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5): 341
- [12] 张文修, 吴伟志. 粗糙集理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001
- ZHANG Wenxiu, WU Weizhi. Rough set theory and method [M]. Beijing: Science Press, 2001
- [13] 伞冶, 叶玉玲. 粗糙集理论及其在智能系统中的应用 [J]. 智能系统学报, 2007(2): 40
- SAN Zhi, YE Yuling. Rough set theory and its application in the intelligent systems [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007(2): 40
- [14] ZHAO H, MIN F, ZHU W. Test-cost-sensitive attribute reduction based on neighborhood rough set [C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Granular Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 802
- [15] 肖劲森, 孙立民. 改进的粗糙集属性重要度 [J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(3): 174
- XIAO Jinsen, SUN Limin. Improved attribute significance degree based on rough set [J]. Computer Engineering and applications, 2017, 53(3): 174
- [16] 付允, 刘怡君. 指标体系有效性的 RST 评价方法及应用 [J]. 管理评论, 2009, 21(7): 91
- FU Yun, LIU Yijun. The RST evaluation method of indicator system validity and its application [J]. Management Review, 2009, 21(7): 91
- [17] CHANG S. A novel attribute reduction method based on rough set—sand its application [J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2012, 4(3): 99

(编辑 王小唯)