

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201712026

车辆驾驶性评估方法在蠕行工况中的应用

黄 伟¹, 刘海江¹, 童荣辉², 李 敏¹

(1. 同济大学 机械与能源学院, 上海 201804; 2. 上海汽车集团股份有限公司, 上海 200041)

摘 要:为解决评估体系构建方法不科学, 评估指标权重计算及主客观权重分配不合理的问题, 提出构建驾驶性评估体系和计算指标权重的新方法. 考虑车辆驾驶性在蠕行工况的内涵, 基于 SMART 原则对驾驶性评估体系进行设计, 从纵向响应特性、纵向平顺特性、纵向稳态特性 3 个维度构建了蠕行工况驾驶性评估体系; 提出用网络层次分析和组合熵分别计算主客观权重, 并设计结合网络层次和组合熵的综合权重优化模型, 用于计算评估体系中各评估指标权重, 使其兼顾主观性和客观性. 应用该方法进行多辆车的蠕行工况驾驶性评估, 对比分析不同权重计算方法的评估结果. 结果表明: 本文提出的方法得到的评估结果较层次分析、熵权等方法更准确, 该评估体系构建方法更具科学性, 权重计算方法更有效.

关键词: 蠕行工况; 驾驶性; SMART 原则; 评估体系; 网络层次分析; 组合熵

中图分类号: U467 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)07-0126-05

Application of assessment method of vehicle drivability in creep conditions

HUANG Wei¹, LIU Haijiang¹, TONG Ronghui², LI Min¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Motor Corporation Limited, Shanghai 200041, China)

Abstract: To solve the problems that the construction method of assessment system was unscientific, the weight calculation of evaluation indexes and the distribution of subjective and objective weight were irrational, a new method of constructing evaluation system of drivability for vehicles and determining indexes weight for drivability evaluation was proposed. Considering the connotation of vehicle drivability in creep condition, the drivability evaluation system of creep condition was designed based on SMART principle, and the evaluation system was established from three dimensions of longitudinal response, longitudinal smooth and longitudinal steady state. The analytic hierarchy process and combined entropy was also proposed to calculate the subjective and objective weights respectively, and a comprehensive weight optimization model was designed based on network hierarchy and combined entropy to calculate the weight of evaluation indexes in the evaluation system to balance the subjectivity and objectivity. Many vehicles were evaluated under creep condition and the results show that the evaluation results obtained by the proposed method are more accurate than those by the analytic hierarchy process and the entropy weight method. The construction method of the evaluation system is more scientific and the weight calculation method is more effective.

Keywords: creeping condition; drivability; SMART criteria; evaluation system; analytic network process; combination entropy

驾驶性品质反映了汽车在行驶过程中纵向的人车交互的综合感知, 是影响消费者购买意愿的关键因素之一^[1]. 关于驾驶性评估体系和方法的研究, Dorey 等^[2]从车辆平顺性特性、稳态特性方面进行研究, 提出了冲击度、迟滞等评估指标. Schoegg 等^[3]提出了基于神经网络的驾驶性评估模型, 但需大量样车和评估数据进行模型训练. 宗长富以及雷

雨龙等^[4-5]构建了考虑了平顺特性的驾驶性评估体系. 章桐等^[6]提出了从平顺性、瞬态响应等维度构建驾驶性评估体系, 但未提出构建方法. 刘普辉等^[7]提出基于层次分析法的主观权重计算方法, 但采用该方法的前提是假设同一层的评估指标相互独立, 忽略了指标间的影响. LIST 等^[8]提出了客观权重计算方法, 但忽略了驾驶员的主观感受, 违背了驾驶性开发服务于人的初衷. 上述研究在评估体系建立方法上, 都是基于先验知识建立的, 未结合科学地指导方法; 在权重计算方面, 如何科学地进行主客观权重计算和权重分配的问题未得到很好地解决.

本文提出了基于 SMART 原则的蠕行工况驾驶性评估体系构建方法, 并设计了结合网络层次和组

收稿日期: 2017-12-05
基金项目: 中国汽车产业创新发展联合基金(U 1764259);
上海汽车工业科技发展基金(1517);
上海市科学技术委员会(15111103402)
作者简介: 黄 伟(1989—), 男, 博士研究生;
刘海江(1967—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 刘海江, defensec@tongji.edu.cn

合熵的评估指标主客观权重计算和优化模型,并通过实验验证了本文提出方法的可行性.

1 蠕行工况驾驶性评估体系

1.1 驾驶性评估体系构建指导方法

考虑到配电网评估和驾驶性评估都是一个多层次、多因素的复杂问题,本文尝试借鉴配电网评估体系的构建方法^[9],基于 SMART 准则构建驾驶性评估体系. 以 SMART 准则作为设计驾驶性评估体系的指导思想,结合驾驶性评估多角度、多因素的特点,对 SMART 在驾驶性评估体系设计中的具体应用和内涵进行研究和探讨,从特定性、可测量性、可得到性、相关性、可跟踪性等方面对评价目的、指标获取渠道、评价体系构成原则等提出具体要求. 其中,特定性要求明确驾驶性评估体系中的评估目标;可测量性要求以相同的标准作为统一的尺度,来衡量被评价对象的表现;可得到性要求选取可量化的驾驶性评估指标;相关性要求明确驾驶性评估体系中各指标层、目标层之间内在的逻辑关系;可跟踪性要求评估指标的数据源头可跟踪,以便服务于后续控制策略标定工作.

1.2 蠕行工况驾驶性评估指标集

对蠕行控制机理进行分析^[10],确定了驾驶性评估指标,并依据 SMART 准则中的可得到性、可跟踪性要求对评估蠕行工况驾驶性的宏观指标和微观指标进行设计. 在宏观指标中,纵向响应特性是在行

驶方向车辆能提供给人对响应需求能力的描述;纵向平顺特性是在行驶方向车辆能够满足人对舒适性要求能力的描述;纵向稳态特性是在行驶方向车辆能达到人期望稳态能力的描述. 微观指标是对宏观指标的具体量化,其中,纵向响应特性具体量化指标包括响应时间、响应延迟等;纵向平顺特性具体量化指标包括松制动冲击、喘振等;纵向稳态特性具体量化指标包括稳车速时间等.

1.3 蠕行工况驾驶性评估体系的构建

本文依据 SMART 原则中的特定性要求,明确了蠕行工况驾驶性目标,评估体系中的指标应围绕蠕行工况驾驶性这一目标进行设计. 依据 SMART 原则中可得到性和可追踪性要求,根据定量与定性指标相结合的原则,明确了蠕行工况驾驶性的宏观指标和微观指标,并选择合适粒度进行适当地细分. 评估体系是由一组具有内在逻辑关系的指标和目标所构成,各宏观指标应和目标相关,同时各个微观指标应对宏观指标给予描述. 依据 SMART 原则的相关性要求,建立式(1)所示的关系模型,并建立表 1 所示的蠕行工况驾驶性评估体系.

$$\begin{cases} F = \lambda_1 S_1 + \cdots + \lambda_i S_i + \cdots + \lambda_n S_n, \\ \text{s.t.} \\ S_i = \psi(x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ij}, \cdots, x_{im}). \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为蠕行工况驾驶性; $0 \leq S_i \leq 10$ 为宏观指标, $i = 1, 2, \cdots, n$; x_{ij} 为微观指标, $j = 1, 2, \cdots, m$; $0 < \lambda_i < 1$ 为权重系数; ψ 为微观指标之间的关系函数.

表 1 蠕行工况驾驶性评估体系

Tab.1 Drivability evaluation system of vehicle level in creep condition

目标	宏观指标层	微观指标层	微观指标含义
蠕行工况驾驶性	纵向响应特性	响应延迟	松掉制动踏板后车辆从静止到运动状态所需时间
		响应时间	松掉制动踏板到车辆达到最大加速度所用时间
	纵向平顺特性	松制动冲击	由松制动踏板引起的最大纵向加速冲击
		喘振	在蠕动过程中纵向加速度出现的高频振动
	纵向稳态特性	稳车速时间	松掉制动踏板到车辆达到车速稳定的时间

2 蠕行工况驾驶性评估指标权重的计算

2.1 评估指标主观权重计算

以往主观权重计算多采用层次分析(analytic hierarchy process, AHP)^[11]法,其假设同一层的评估指标相互独立. 在蠕行工况驾驶性评估体系中,因同一级别评估指标间相互影响,采用层次分析法计算主观权重造成评估结果准确性较差. 针对上述缺陷,引入网络层次分析(analytic network process, ANP)^[12],利用层次网络结构解析评估指标间的复杂关系,求得更合理的主观权重. 根据层次网络结构,将评估目标和宏观指标作为控制层,微观指标

作为网络层,计算各指标主观权重的主要步骤包括:

步骤 1 在确定蠕行工况驾驶性评估体系的基础上,分析微观指标间的相互关系,以评估目标和宏观指标为控制层,微观指标为网络层建立图 1 所示的 ANP 模型.

步骤 2 用九标度法^[13]量化微观指标的重要性,构建 ANP 结构下的判断矩阵 A , 计算特征根求得特征向量 δ , 加权计算得到加权超矩阵 $\bar{\delta} = a_{ij} \cdot \delta_{ij}$.

步骤 3 通过 $\delta^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \bar{\delta}^i$ 求解其极限唯一来判断超矩阵的稳定程度,如果极限收敛且唯一,则由判断矩阵求得特征向量,并归一化处理得到评

估体系中各指标的主观权重.

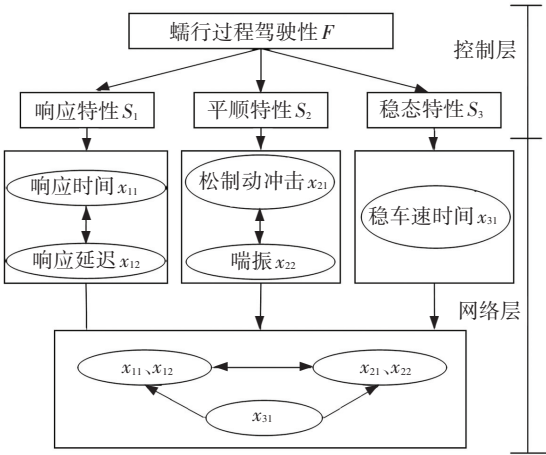


图 1 蠕行工况驾驶性 ANP 结构模型

Fig.1 ANP structure model of drivability in Creep condition

2.2 评估指标客观权重计算

熵权(entropy weight, EW)法多用于客观权重计算,其原理是通过求解信息熵得到各指标权重^[14-15].但采用该方法计算蠕行工况驾驶性的评估指标权重,会因数据差异度敏感性过大,出现部分指标权重过小的情况.为避免上述问题,本文提出了组合熵计算评估指标的客观权重——组合熵权和反熵权,利用反熵权同权重成正比降低数据特征差异度的敏感性.计算蠕行工况驾驶性评估指标客观权重的主要步骤包括:

步骤 1 对评估指标值标准化处理,并计算各评估指标的熵值和反熵值:

$$h_j = \frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln(r_{ij}),$$
$$h'_j = - \frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln(1 - r_{ij}).$$

式中: $r_{ij} = c_{ij} / \sum_{j=1}^m c_{ij}$ 为概率系数, c_{ij} 为标准化处理后的指标, h_j 为评估指标熵, h'_j 为评估指标反熵, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$.

步骤 2 考虑到熵值和反熵值对评估指标的客观权重的计算同等重要,求解评估体系中各指标客观权重如下:

$$\sigma_j = 1/2(h_j / \sum_{j=1}^m h_i + h'_j / \sum_{j=1}^m h'_j). \quad (2)$$

式中 σ_j 为客观权重, $j = 1, 2, \dots, m$.

2.3 评估指标综合权重计算

为克服单一赋权法的缺点,科学地进行主客观权重分配,建立如下权重优化模型:

$$\min F(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{ \mu [(\omega_j - \delta_j)x_{ij}]^2 + (1 - \mu)[(\omega_j - \sigma_j)x_{ij}]^2 \},$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1, \quad \omega_j \geq 0. \quad (3)$$

根据拉格朗日求解公式(3),如果满足 $\sum_{j=1}^m x_{ij}^2 > 0$,则上述模型存在唯一解,其解为

$$\omega_j = \mu \delta_j + (1 - \mu) \sigma_j. \quad (4)$$

式中: μ 为主客观权重偏好系数; δ_j 为主观权重; ω_j 为综合权重, $j = 1, 2, \dots, m$.

3 算法实例

实验数据源于国内市场上部分车型共 40 辆,实验场地为平坦直线道路,数据采集设备包括 NeoVI FIRE、IMU、Vehicle Spy3、笔记本电脑,其中,IMU 为惯性测量设备,用于测量车速和加速度. NeoVI Fire 为汽车多总线接口,用于连接和读取汽车总线和 IMU 中的信号. Vehicle Spy3 为数据采集软件系统.实验人员为 5 名专业评估人员.在进行蠕行工况实验时,车辆上所有设备处于关闭状态,数据采集和评估工作同时进行,对采集后的数据通过指标识别算法处理得相应的蠕行工况驾驶性评估指标,同时将 5 名评估人员的评估结果做进一步数值处理,得到一个综合评分作为真值,验证不同权重计算方法得到评估结果的准确性.

根据图 1 所示的 ANP 结构模型,借助 Super Decisions 软件计算得到表 2 所示的主观权重及对应极限.由表 2 可知,对蠕行工况驾驶性影响最大的宏观指标为纵向响应特性,其次是纵向平顺特性.究其原因,蠕行工况反映车辆从静止到运动的过程,响应特性最直观地描述这一过程,其次是描述人舒适性感受的平顺特性.权重最大的微观指标为响应时间,其次为喘振.从各指标对应的极限看,各指标的极限收敛且唯一,计算得到的主观权重稳定且有效.

表 2 主观权重及对应的极限

Tab.2 Subjective weights and corresponding limits

指标	权重	极限
纵向响应特性	0.52	0.259
纵向平顺特性	0.36	0.179
纵向稳态特性	0.12	0.062
响应延迟	0.35	0.090
响应时间	0.65	0.170
松制动冲击	0.29	0.050
喘 振	0.71	0.130
稳车速时间	1.00	0.060

用 30 辆车的数据根据式(2)计算评估指标的客观权重,再利用式(4)求解综合权重,考虑权重偏好系数的选择会影响评估结果,将权重偏好系数分

别设定为 0.2、0.4、0.6、0.8, 计算得到的权重如表 3 所示. 从表 3 可看出, 响应延迟和响应时间的权重同偏好系数正相关, 松制动冲击的权重同偏好系数负相关, 喘振和稳车速时间的权重对偏好系数不敏感. 为进一步分析主客观权重与综合权重的关系, 利用 Spearman 秩相关性系数法^[16]对其进行一致性分析, 从表 4 分析结果得出, 主观权重和客观权重同综合权重都具有较高的一致性. 随着权重偏好系数越来越大, 综合权重同主观权重的相关性越高, 同客观权重的相关性越低; 从整体看, 综合权重受主观权重的影响程度更明显, 想降低主观权重的影响, 应适当选择较小的权重偏好系数.

表 3 不同权重系数的指标权重

Tab.3 Index weights for different weight coefficients

方法	指标权重				
	响应延迟	响应时间	松制动冲击	喘振	稳车速时间
ANP	0.18	0.34	0.10	0.26	0.12
组合熵	0.13	0.26	0.23	0.23	0.15
权重系数	0.20	0.14	0.28	0.20	0.14
	0.40	0.15	0.29	0.18	0.24
	0.60	0.16	0.31	0.15	0.25
	0.80	0.17	0.32	0.13	0.25

表 4 主客观权重同综合权重的相关系数

Tab 4 Correlation coefficients of subjective and objective weight and comprehensive weight

方法	权重系数			
	0.20	0.40	0.60	0.80
ANP	0.79	0.89	0.96	0.99
组合熵	0.95	0.87	0.74	0.65

为验证构建评估体系方法和权重算法的有效性, 采用文献[17]的方法建立蠕行工况驾驶性模糊矩阵, 分别用 AHP^[7]、熵权^[8]、ANP、组合熵以及综合权重进行驾驶性评估, 结果见表 5.

表 5 不同权重计算方法的驾驶性评分

Tab.5 Drivability score of different weight calculation methods

车辆	评分					权重系数			
	真值	熵权	ANP	AHP	组合熵	0.20	0.40	0.60	0.80
1	7.00	6.91	7.12	7.05	6.96	7.00	7.03	7.06	7.09
2	7.30	7.35	7.39	7.14	7.25	7.28	7.31	7.34	7.36
3	7.30	7.08	7.38	7.35	7.15	7.20	7.25	7.29	7.34
4	7.90	7.40	8.02	8.05	7.70	7.73	7.80	7.88	7.95
5	7.40	7.15	7.43	7.50	7.35	7.29	7.33	7.36	7.40
6	6.80	6.51	6.64	6.58	6.60	6.76	6.82	6.85	6.89
7	7.80	7.56	8.00	8.00	7.64	7.72	7.80	7.89	7.95
8	7.70	7.61	7.95	7.88	7.64	7.69	7.76	7.82	7.88
9	7.80	7.61	8.08	7.13	7.71	7.78	7.86	7.94	8.00
10	7.30	7.09	7.39	6.52	7.16	7.20	7.25	7.30	7.34

从表 5 中不同权重计算方法得到的驾驶性评分可得出, 大部分车辆驾驶性的真实评分处于 7~8 分之间, 根据车辆驾驶性十分制评分标准^[18], 驾驶员的驾驶体验感为“满意”, 其中样车 6 较其他车辆驾驶体验感偏差, 但也达到“基本满意”. 在主客观权重方面, 采用 ANP 和 AHP 计算的驾驶性评分出现了超过 8 分的评分, 将达到“满意”标准的车辆误判为“好”的标准; 样车 10 采用 AHP 计算的评分将达到“满意”标准的车辆误判为“基本满意”的标准, 说明单独采用主观权重计算驾驶性评分其稳定性较差. 在客观权重方面, 采用熵权和组合熵计算的驾驶性评分未出现主观权重存在的问题, 其具有较好的稳定性. 对比熵权和组合熵, 组合熵计算的驾驶性评分明显更接近真值, 说明组合熵比熵权更合适客观权重的计算. 从不同权重偏好系数的综合权重得到的驾驶性评估结果看, 权重偏好系数的选择对评估结果有一定影响, 偏好系数过大或过小都会远离真值, 评估人员进行偏好系数设定时, 建议偏好系数在 0.4~0.6. 从不同权重方法计算多辆车驾驶性评分的累积误差看, 由小到大依次为综合权重(偏好系数 0.4)、综合权重(偏好系数 0.6)、综合权重(偏好系数 0.2)、综合权重(偏好系数 0.8)、组合熵、ANP、熵权、AHP, 采用不同偏好系数的综合权重计算得到的驾驶性评估结果较其他方法更接近真值, 说明采用综合权重计算的驾驶性较其他方法更准确, 该方法具有较好的鲁棒性.

对比平顺特性的评估体系、响应特性的评估体系以及稳态特性的评估体系, 验证本文提出构建评估体系方法的科学性. 用偏好系数 0.4 的综合权重计算不同评估体系的评分如表 6 所示, 从表 6 可看出, 与平顺特性的评估体系、响应特性的评估体系以及稳态特性的评估体系等“非整体性”评估体系相比, 本文构建的评估体系能得到更准确的评估结果, 评估体系更具有整体性和统一性, 说明了该方法的有效性和实用性.

表 6 不同体系的评估结果

Tab.6 Evaluation results of different systems

车辆	真值	本文	响应	平顺	稳态
1	7.00	7.03	6.91	7.19	7.11
2	7.30	7.31	7.26	7.38	7.28
3	7.30	7.25	7.17	7.36	7.23
4	7.90	7.80	7.69	7.93	7.88
5	7.40	7.33	7.22	7.47	7.36
6	6.80	6.82	6.65	7.09	6.78
7	7.80	7.80	7.71	7.92	7.68
8	7.70	7.76	7.63	7.97	7.69
9	7.80	7.86	7.81	7.89	7.98
10	7.30	7.25	7.13	7.41	7.33

4 结 论

1) 基于 SMART 原则从纵向响应特性、纵向平顺特性、纵向稳态特性等 3 个维度构建了蠕行工况驾驶性评估体系。

2) 提出了网络层次分析结构的主观权重计算方法,准确解析了指标之间的复杂关系。

3) 提出了熵权和反熵权的组合熵的客观权重计算方法,解决了指标差异度的敏感性问题。

4) 设计了结合网络层次和组合熵的优化权重模型,得到更合理的指标权重。并验证了综合权重的优势。

5) 本文提出的评估体系构建方法可扩展到其他工况评估体系的构建。同时,提出的权重计算方法可以增减评估指标对权重做调整,以实现更全面的评估。

参考文献

- [1] CHANG W S, KIM H, KIM M K, et al. Development of an evaluation method for quantitative driveability in heavy-duty vehicles[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2014, 28(5): 1615-1621. DOI: 10.1007/s12206-014-0107-5.
- [2] DOREY R E, MARTIN E J. Vehicle driveability-the development of an objective methodology[C]// SAE 2000 World Congress. Ricardo Consulting Engineers. Detroit: SAE International, 2000. DOI: 10.4271/2000-01-1326.
- [3] SCHOEGL P, RAMSCHAK E. Vehicle driveability assessment using neural networks for development, calibration and quality tests [C]// SAE 2000 World Congress. Detroit: SAE International, 2000: 1385-1390. DOI: 10.4271/2000-01-0702.
- [4] 宗长富,陈双,冯刚,等.基于频率加权滤波的汽车平顺性评估[J].吉林大学学报, 2011, 41(6): 1517-1521. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb2011.06.043.
ZONG Changfu, CHEN Shuang, FENG Gang, et al. Evaluation of vehicle ride comfort based on frequency weighted filtering [J]. Journal of Jilin University (Engineering), 2011, 41 (6): 1517-1521. DOI: 10.13229/ j. cnki. jdxbgxb 2011. 06.043.
- [5] 雷雨龙,刘科,付尧,等.基于理想换挡过程的换挡品质评估模型[J].吉林大学学报, 2015, 45(2): 358-363. DOI: 10.13229/j.cnki.Jdxbgxb201502004.
LEI Yulong, LIU Ke, FU Yao, et al. Evaluation model of shift quality based on ideal gear shifting process [J]. Journal of Jilin University (Engineering), 2015, 45 (2): 358-363. DOI: 10.13229/ j. cnki. Jdxbgxb201502004.
- [6] 章桐,刘普辉.汽车燃油经济性 & 动力性与驾驶性客观评估体系[J].同济大学学报, 2015, 43(12): 1865-1872. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2015.12.015.
ZHANG Tong, LIU Puhui. Objective evaluation system of automobile fuel economy power and driving performance [J]. Journal of Tongji University, 2015, 43 (12): 1865-1872. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2015.12.015.

- [7] 刘普辉,章桐.基于模糊层次分析法的汽车驾驶性主观评估[J].中国工程机械学报, 2016, 14(2): 181-186. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5581.2016.02.017.
LIU Puhui, ZHANG Tong. Subjective evaluation of car driving based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of China engineering machinery, 2016, 14 (2): 181-186. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5581.2016.02.017.
- [8] LIST H O, SCHOEGL P. Objective evaluation of vehicle drivability [C]// International Congress & Exposition. Detroit: SAE International, 1998. DOI: 10.4271/980204.
- [9] 张红斌,吴志力,葛斐,等.基于 SMART 原则的配电自动化建设效果评估体系研究[J].电网技术, 2016(7): 2192-2198. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.07.039.
ZHANG Hongbin, WU Zhili, GE Fei, et al. Study on evaluation system of distribution automation construction based on SMART criterion [J]. Power-system technology, 2016(7): 2192-2198. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.07.039.
- [10] ZHOU B, LU T, ZHANG J, et al. Vehicle creep control based on nonlinear robust method for dual-clutch transmission [J]. Journal of Systems & Control Engineering, 2017, 231(8): 600-613. DOI: 10.1177/0959651817711821.
- [11] ZAIM S, SEVKLI M, CAMGOZ H, et al. Use of ANP weighted crisp and fuzzy QFD for product development [J]. Expert Systems with Applications an International Journal, 2014, 41(9): 4464-4474. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.01.008.
- [12] SAATY T L. The modern science of multicriteria decision making and its practical applications; the AHP/ANP approach [J]. Operations Research, 2013, 61(5): 1101-1118. DOI: 10.1287/opre.2013.1197.
- [13] 刘小玲,黄侨,任远,等.斜拉桥多指标证据融合的综合评估方法[J].哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 74-79. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.012.
LIU Xiaoling, HUANG Qiao, REN Yuan, et al. Multi index comprehensive evaluation of evidence fusion method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49 (3): 74-79. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.012.
- [14] LI X, WANG K, LIU L, et al. Application of the entropy weight and topsis method in safety evaluation of coal mines [J]. Procedia Engineering, 2011, 26(4): 2085-2091. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2410.
- [15] SU H, ZHU C. Application of entropy weight coefficient method in evaluation of soil fertility [M]// Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. Heidelberg: Springer, 2012: 697-703.
- [16] MYERS J L, WELL A D. Research design and statistical analysis [M]. 2nd ed. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2010: 235-236.
- [17] LIU H J, HUANG W. The research of drivability evaluation index and quantitative method [C]// SAE-TONGJI 2016 Driving Technology of Intelligent Vehicle Symposium. Detroit: SAE Technical Paper, 2016. DOI: 10.4271/2016-01-1906.
- [18] DOREY R E, GONDRE B A C. Driveability rating method and system; US 7149607B2 [P/OL]. <http://patents.google.com/patent/US7149607>.

(编辑 杨 波)