

DOI: 10.3901/JME.2021.12.099

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*

魏子茹 卢延辉 王鹏宇 马天飞 赵世杰
(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130022)

摘要: 合理的测试场景和科学客观的评价方法能促进无人驾驶技术的快速发展,但目前无人驾驶车辆定量评价方法中仍需要一定人为参与,导致评价结果存在较强的主观性。利用层次分析法(Alytic hierarchy process, AHP)与基于层间相关性的客观赋权法(Criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)确定评价指标权重,采用灰色关联理论评价方法对车辆进行定量评价。试验结果表明灰色关联理论评价方法与传统模糊综合评价法的评价结果具有较高的一致性,同时降低了评价方法主观性和实际应用中企业邀请大量专家参与评价的成本。

关键词: 无人驾驶车辆; CRITIC 法; 灰色关联理论; 指标权重; 测试评价

中图分类号: U461

Application of Grey Correlation Theory Based on CRITIC Method in Autonomous Vehicles Test and Evaluation

WEI Ziru LU Yanhui WANG Pengyu MA Tianfei ZHAO Shijie
(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: Reasonable test scenarios and objective evaluation methods could rapidly promote the development of autonomous technology, but the current quantitative evaluation methods of autonomous vehicles still need some human participation, which led to the strong subjectivity of the evaluation results. The analytic hierarchy process (AHP) and the criteria importance though intercriteria correlation (CRITIC) were utilized to determine the weight of evaluation index, and the grey correlation theory was implemented to evaluate the vehicle quantitatively. The experimental results shown that the evaluation results of the grey correlation theory and the traditional fuzzy comprehensive evaluation method had high consistency. Meanwhile, the proposed methodology reduced the subjectivity and saved the cost of inviting a large number of experts to participate in the evaluation.

Key words: autonomous vehicles; CRITIC method; grey correlation theory; index weight; test evaluation

0 前言

随着计算机及传感器技术的飞速发展,汽车逐渐趋于自动化、网联化及智能化,无人驾驶车辆也具有了感知,决策,规划和控制的能力^[1]。自动驾驶技术快速发展的同时,也需要测试和改进,此时,对无人驾驶车辆的测试评价就显得尤为重要了。目前,已有一些学者对无人驾驶车辆的测试评价开展研究,北京理工大学的孙扬^[2]从任务复

杂度,环境复杂度和人工干预程度三方面建立车辆测评模型,将可拓展的层次分析法与模糊综合评价方法结合完成了“中国智能车未来挑战赛”中无人驾驶车辆智能水平的定量评价;李凤娇^[3]用层次分析法与模糊综合评价法对无人驾驶车辆的综合避障行为进行了评价,董芳^[4]针对弯道环境下无人驾驶车辆智能行为的评价进行了研究。现有的无人驾驶车辆评价方法中,大多采用层次分析法、可拓展的层次分析法与模糊综合评价法结合的方法,带有很强的主观因素影响,且目前对无人驾驶车辆的评价大部分针对某些特定场景、车辆特定行为或者单一的车辆智能性。

* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0105103)。20201110 收到初稿,20210507 收到修改稿

1 无人驾驶车辆测试场景设计

无人驾驶车辆在实际道路上行驶时,道路场景及环境均为未知量,且复杂多变,因而在不同复杂度的场景中测试,可以很好地验证无人驾驶车辆的各项性能^[5]。测试场景包括测试内容与测试环境两部分。

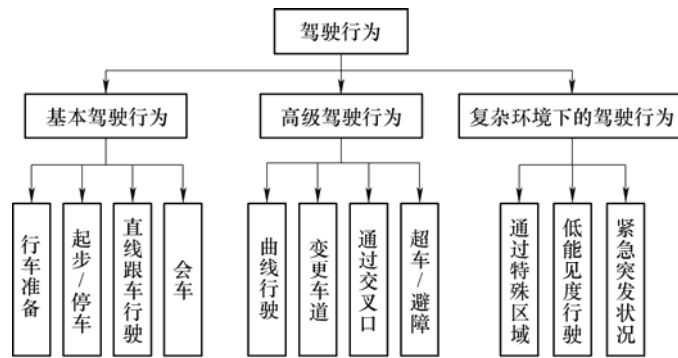


图 1 无人驾驶车辆驾驶行为分类

测试环境要素及组成如表 1 所示,包括道路环境,天气与光照环境,交通信号环境,障碍物环境,听觉以及外界干扰环境^[8]。不同的道路拓扑环境,可以测试无人驾驶车辆的车道线识别能力;不同的路面状况,可以测试车辆的控制能力;交通信号环境和障碍物环境的改变,可以有效测试车辆对外界的感知能力。真实的车辆行驶环境复杂多变,因而测试环境也要尽可能的多样化,通过将不同的环境要素进行排列组合,就能得到不同复杂度的测试环境。

表 1 测试环境要素及组成

环境要素	要素组成
道路环境	路表:沙石、沥青、水泥 道路拓扑:弯道、环岛、十字路口、坡道 路面状况:积水、积雪、结冰
天气与光照环境	天气:晴天、雨天、雪天、冰雹 光照:正午直射,黄昏斜射,傍晚
交通信号环境	交通标志:限速、禁止左转、学校路段 交通道路线:单双实线、虚线、斑马线 交通信号灯
障碍物环境	静态:路障、消防栓、道路围栏 动态:车辆、行人、非机动车
听觉环境	救护车、消防车、警车
外界干扰环境	电磁干扰、GPS 受限

将不同复杂度的测试内容与测试环境进行组合^[9],完成无人驾驶车辆测试场景的设计。

测试内容包括无人驾驶车辆对外界的感知能力,信息决策能力,规划与控制能力,并且测试内容要尽可能接近真实的交通情况^[6]。由于不同车辆的智能水平不同,测试内容将划分为不同的难度,无人驾驶车辆在测试中需要完成的驾驶行为也划分为不同复杂度^[7]。如图 1 所示,依据有人驾驶行为将无人驾驶车辆的驾驶行为划分为基本驾驶行为,高级驾驶行为,以及复杂环境下的驾驶行为。

2 无人驾驶车辆评价指标体系

无人驾驶车辆在测试场景中完成测试后,需要对车辆表现进行评价^[10]。如图 2 所示,基于 CRITIC 法的灰色关联理论评价方法中,无人驾驶车辆评价体系包括三部分:确定无人驾驶车辆评价指标,利用 CRITIC 法与 AHP 法确定评价指标权重,以及确定评价方法。

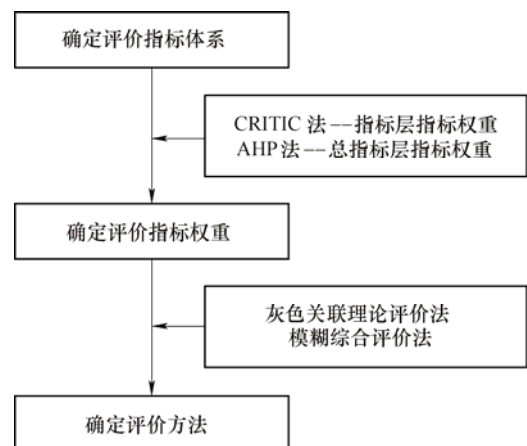


图 2 无人驾驶车辆评价流程

无人驾驶车辆评价指标体系是无人驾驶车辆评价的基础,合理科学的评价指标体系,才能得出科学公正的评价结果。因而无人驾驶车辆评价指标体

系的构造应遵循全面性、科学性、目的性、可比性以及可操作性原则^[11]。基于现象学理论，通过对无人驾驶车辆在测试中的表现进行评价，完成无人驾驶车辆的评价。

无人驾驶车辆的评价指标应综合考察无人驾驶车辆对周围车辆、障碍物以及交通标志的感知能力；对传感器信息的处理和基于信息的决策能力；对减速停车、换道避让、超车等不同驾驶行为的规划能

力；对自身车辆转向、制动以及加速的控制能力；综合体现无人驾驶车辆的各项性能。本文依据无人驾驶车辆在测试过程中的速度变化、加速度的波动、横摆角速度的峰值、以及车辆对障碍物和交通标识的识别率等方面的考察，最终将从车辆行驶的行驶安全性，乘坐舒适性，智能性，高效性四个总指标对无人驾驶车辆分层次进行评价，每一个总指标下有对应的细化指标层，如图 3 所示。

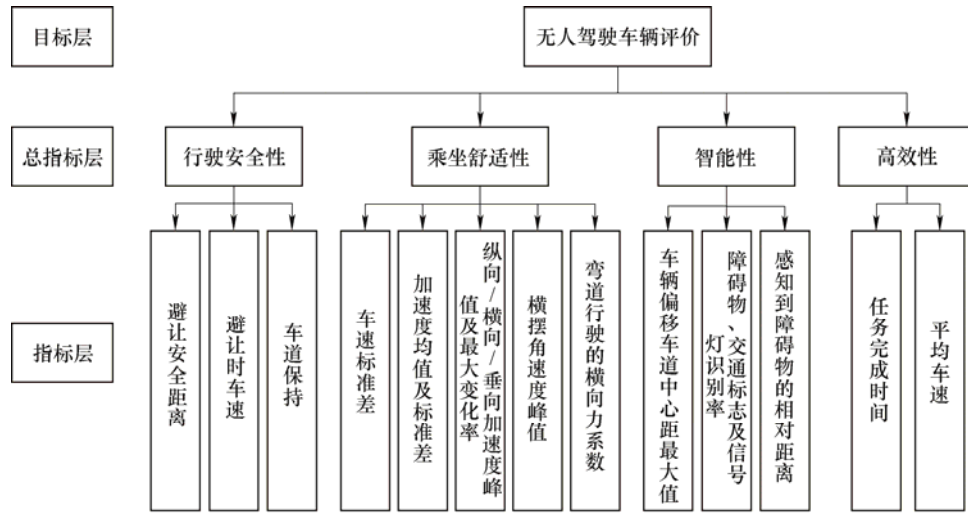


图 3 无人驾驶车辆评价指标体系

3 无人驾驶车辆评价指标权重的确定

无人驾驶车辆评价指标确定后，要对无人驾驶车辆进行定量评价，需要确定评价指标的权重，指标权重确定方法可分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法由专家根据经验进行主观判断得到权重，应用较多的是层次分析法。客观赋权法通过对实际获得的指标属性值进行计算分析，进而得出权重系数。由于主观赋权法的决策具有较强的主观随意性，并且容易受决策者知识缺乏的影响，客观性较差，应用中有很大的局限性^[12]。由于本文评价指标层中的指标可由数值量化表示，因而采用 CRITIC 客观赋权法确定指标层的指标权重；总指标层的指标不易直接量化表示，采用主观赋权法中的层次分析法确定总指标层的指标权重。

3.1 指标层各指标权重确定方法

CRITIC 客观赋权法是依据层间相关性的重要性准则来计算权重的一种赋权法。CRITIC 法适用于具有一定稳定性，并且分析的指标或因素之间有一定的关联关系的数据。该方法同时考虑数据波动性与数据间相关关系对权重的影响，以对比强度与指标间冲突性为基础确定指标权重，对比强度通常取

数据标准差，考虑到均值对对比强度的影响，本文取变异系数作为对比强度；指标间冲突性则以指标之间的相关性为基础，若两个指标之间具有较强的正相关，则说明两个指标冲突性较低。CRITIC 法计算指标权重步骤如下。

(1) 数据标准化。假设有 n 个评价对象， m 个评价指标，首先区分指标的正负性，正向指标也称效益指标，指标值越大越好；负向指标也称成本指标，指标值越小越好。由于各项指标的计量单位并不统一，因此在对这些指标计算前，要先对指标进行标准化处理。

正向指标

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (1)$$

负向指标

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (2)$$

(2) 计算对比强度

$$V_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中， V_j 是第 j 项指标的变异系数，也称为标准差系数， σ_j 是第 j 项的标准差， \bar{x}_j 是第 j 项的平均数。

(3) 计算相关系数和冲突性量化指标值。第 i 个指标和第 j 个指标之间的相关系数

$$r_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^n (x_{hi} - \bar{x}_i)(x_{hj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n (x_{hi} - \bar{x}_i)^2 \sum_{h=1}^n (x_{hj} - \bar{x}_j)^2}} \quad i \neq j \quad (4)$$

式中, x_{hi} 和 x_{hj} 是第 h 个评价对象的第 i 个指标和第 j 个指标的值, \bar{x}_i 和 \bar{x}_j 是 n 个对象中第 i 个指标和第 j 个指标的均值。

第 j 个指标与其他指标的冲突性量化指标值为

$$\sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad i \neq j \quad (5)$$

(4) 计算指标信息量。各个指标的客观权重是以对比强度和冲突性来综合衡量的。设 C_j 表示第 j 个评价指标所包含的信息量, 则 C_j 可以表示为

$$C_j = V_j \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad i \neq j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

(5) 计算指标权重

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中, C_j 越大, 第 j 个评价指标所包含的信息量越大, 该指标的相对重要性也就越大, 即权重越大。

3.2 总指标层各指标权重确定方法

总指标层中车辆的行驶安全性, 乘坐舒适性, 智能性和高效性指标不易直接量化, 采用层析分析法确定指标权重。AHP 法的基本思想是按照问题要求建立一个描述系统功能或特征的递阶层次结构, 通过两两比较因素的相对重要性, 构成上层因素对下层相关因素的判断矩阵, 以给出下层相关因素对上层因素的相对重要程度组成的序列。本文利用层次分析法确定车辆行驶安全性, 乘坐舒适性, 智能性, 高效性四个指标对无人驾驶车辆评价的相对重要性序列。层次分析法计算指标权重步骤如下。

(1) 构造判断矩阵。请专家依据重要度定义表, 对无人驾驶车辆 n 个指标两两进行重要性比较, 按照表 2 中 1~9 的标度打分。

表 2 标度重要度定义表

标度	重要度定义
1	两个因素比较, 具有同样重要性
3	两个因素比较, 一个因素比另一个因素稍重要
5	两个因素比较, 一个因素比另一个因素重要
7	两个因素比较, 一个因素比另一个因素重要得多
9	两个因素比较, 一个因素比另一个因素极为重要
2,4,6,8	介于上述两个相邻判断的中值

得到对角线为 1 的判断矩阵 A , 如表 3 所示, 且判断矩阵中关于对角线对称的元素值互为倒数。

表 3 重要度比较结果

指标名称	指标 1	指标 2	...	指标 n
指标 1	1	a_{12}	...	a_{1n}
指标 2	a_{21}	1	...	a_{2n}
...
指标 n	a_{n1}	a_{n2}	...	1

(2) 计算指标权重。利用和积法求解判断矩阵 A 的最大特征值及特征向量, 对判断矩阵 A 按列规范化, 再按行相加得和向量

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (8)$$

$$w_i = \sum_{i=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (9)$$

对判断矩阵 A 进行行平均, 得到权重向量 \bar{w}_{ij}

$$\bar{w}_{ij} = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (10)$$

计算判断矩阵 A 的最大特征根值

$$\gamma_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{[A \bar{w}_i]_i}{n(\bar{w}_i)_i} \quad (11)$$

(3) 一致性检验。在判断矩阵特征向量和最大特征值求出之后, 需要对权重合理性进行一致性检验, 一致性检验采用的指标为

$$C.I. = \frac{\gamma_{\max} - n}{n - 1} \quad (12)$$

只要满足

$$\frac{C.I.}{C.R.} < 0.1 \quad (13)$$

即认为判断矩阵具有满意的一致性, 其中 $C.R.$ 为平均随机一致性指标, 取值如表 4 所示。

表 4 平均随机一致性指标

指标 n	3	4	5	6	7
平均随机一致性指标 $C.R.$	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32
指标 n	8	9	10	11	12
平均随机一致性指标 $C.R.$	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54

4 无人驾驶车辆的评价方法

无人驾驶车辆的评价方法包括定性评价方法和

定量评价方法^[13-14]。定性评价方法利用专家的知识、经验和判断,通过观察被评价对象的表现或状态,以归纳分析等非量化手段对无人驾驶车辆进行评价。定量评价方法是采用数学的方法,收集处理数据资料,以数值的形式概括全部的评价信息。常用的定量评价方法包括灰色关联分析法、逼近理想解排序方法、模糊综合评价法、反向传播神经网络法和加权算术平均法。本文采用定量评价方法,采用灰色关联理论评价方法和模糊综合评价法对无人驾驶车辆进行评价。

4.1 灰色关联理论评价方法

灰色系统^[15]是指人们通过信息不能完全充分认知的系统。灰色系统理论是从信息的非完备性角度出发,主要研究和处理复杂系统的理论,并不是从系统内部的特殊规律去分析,通过不断对系统某一层级的信息进行数学加工,在更高层次上实现对系统内部变化趋势、相互关系的理解。

对无人驾驶车辆的评价可以看成是一个灰色系统,评价指标繁杂,无法罗列出所有指标并一一进行评价,因而考虑灰色关联理论分析法对车辆进行评价。灰色关联分析法^[16-18]的研究思路是通过事物发展趋势的变化进行分析,不需要严格要求样本量的大小,也不必事先考虑数据的分布是否为典型的分布规律,且计算量相对较小。灰色关联分析法的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断曲线的联系是否紧密。曲线越接近,相应序列间的关联度就越大,反之就越小。灰色关联理论评价方法根据指标实际值与最优值的关联度大小来判断车辆表现的优劣,通过对最优值的选取降低主观因素的影响,增加了评价结果的客观性。关联度越高,说明车辆表现更优异。灰色关联理论评价方法步骤如下

(1) 确定评价指标,整理指标值得到待评价矩阵。车辆在 m 个测试场景完成试验,对测试数据处理得到 n 个评价指标值,得到待评价矩阵 $(C_{ij})_{m \times n}$, C_{ij} 为第 i 个测试场景中第 j 个指标的值。

(2) 确定参考序列 C_0 , 参考序列值由各指标中的最优值组成。通常情况下,对于正向指标,最优值取该指标在不同测试场景中的最大值;对于负向指标,最优值取该指标在不同测试场景中的最小值;对于存在临界值的指标,最优值取该指标的临界值;对于不易区分正负性的指标,将邀请专家确定指标的最优值。

(3) 对评价指标值进行无量纲处理。用均值法对各指标值进行无量纲处理。

$$X_i(j) = \frac{C_i(j)}{C_j} \quad i=1,2,\dots,m \quad (14)$$

$$C_j = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m C_i(j) \quad j=1,2,\dots,n \quad (15)$$

(4) 计算比较序列与参考序列的关联系数及指标分值。

$$\xi_i(j) = \frac{\min_i \min_j |X_0(j) - X_i(j)| + \rho \max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|}{|X_0(j) - X_i(j)| + \rho \max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|} \quad (16)$$

式中, ρ 为分辨系数,取(0,1)之间,一般取 0.5。计算完成得到关联系数矩阵 $(\xi_{ij})_{m \times n}$, ξ_{ij} 为第 i 个测试场景中第 j 个指标的关联系数。假设不同测试场景的权重都一致,将同一指标在不同场景中的指标分值求均值,得到该指标的均值

$$s_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \xi_i(j) \quad (17)$$

(5) 计算灰色关联度(总指标分值)。将指标分值与指标权重进行加权运算,得到对应总指标层的指标分值。

$$\gamma_h = \sum s_j w_j \quad h=1,2,3,4 \quad (18)$$

再将总指标分值与总指标权重加权运算,得到车辆综合得分。

4.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法^[19]根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合非确定性问题的解决,但模糊综合评价法中需要专家对指标打分,存在很强的主观因素影响。前述无人驾驶车辆的评价指标体系有三层且具有不确定性,故模糊综合评价法适用于该指标体系下无人驾驶车辆的评价。模糊综合评价法步骤如下

(1) 确定无人驾驶车辆指标的评价指标集。

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$$

式中, u_i 为无人驾驶车辆的评价指标, n 是同一层次上单个因素的总数量。

(2) 确定无人驾驶车辆评价集。

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_m\}$$

式中, v_j 为无人驾驶车辆在 j 评价集中的评价结果,评价集是指标的评价结果的取值范围。

(3) 确定评价指标的评价矩阵 R 。

$$R = (R_1, R_2, \dots, R_n) = (r_{ij})_{n \times m}$$

式中, R 中的第 i 行第 j 列表示评价指标 u_i 对评价等级 v_j 的隶属度, 对 n 个评价指标进行评价, 就得到 n 行 m 列的隶属度评价矩阵 R 。

(4) 确定单级模糊综合评价模型。将评价指标的权重与隶属度评价矩阵合成, 得到评价指标的单级模糊综合评价结果

$$B = WR = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (19)$$

式中, $b_j = \sum_{i=1}^n w_i r_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, m)$ 。

(5) 多级模糊综合评价模型。将单级模糊综合评价结果与总指标层的指标权重进行加权运算, 得到无人驾驶车辆的模糊综合评价结果。

$$M = WB \quad (20)$$

(6) 计算综合评价得分。依据车辆得分越高越好的原则, 将评价集的模糊隶属度分为 $\mu = (\text{好}, \text{较好}, \text{一般}, \text{较差}, \text{差})$ 五个等级, 分别赋值为 $\mu = (1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2)$, 综合得分计算公式为

$$C = M\mu \times 100 \quad (21)$$

5 仿真试验分析

无人驾驶车辆测试评价流程如图 4 所示, 以包含三个单一避让测试场景的车辆直道避让场景为例进行仿真试验分析, 在 PreScan 中搭建测试场景, 与 Simulink 进行联合仿真, 得到测试数据, 进行分析评价。

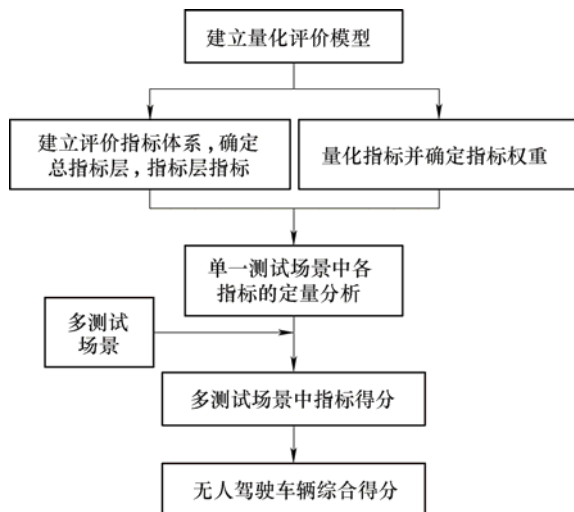


图 4 无人驾驶车辆测试评价流程

5.1 测试数据处理与指标值的计算

在 Simulink 的控制算法中对 PreScan 输出的车辆信息和传感器信息等测试数据进行处理和计算, 得到指标值。车辆信息包括车辆绝对坐标值,

行驶车速、航向角、横摆角速度等; 传感器信息包括障碍物相对距离、相对车速、车道线信息等。需要说明的是, 在试验中无人驾驶车辆的初速度为零, 试验完成后处理的测试数据不包括车辆由零加速至稳定行驶状态的数据, 只对车辆稳定行驶状态至试验结束的测试数据进行处理。处理流程如图 5 所示。

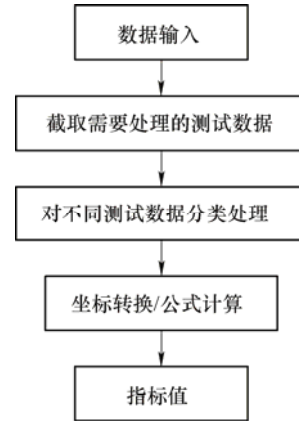


图 5 测试数据处理与指标值计算流程

利用坐标转换公式(22)对车辆的绝对坐标值 (x', y') 进行转换, 再通过计算可以得到相对于车辆坐标系的 x 、 y 向车速 v_x 、 v_y 及加速度 a_x 、 a_y 。

$$\begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' & y' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (22)$$

式中, θ 为车辆航向角。

行驶安全性中避让安全距离和避让时车速指标为车辆开始避让时距离障碍物的距离和速度, 车道保持指标考察车辆在非避让工况下有无越过车道线, 越过车道线该指标值取 1, 反之取 0。

乘坐舒适性中的指标信息可由车速, 加速度, 横摆角速度数据处理得到, 弯道行驶状态下的横向力系数计算公式为

$$\mu = \frac{v^2}{127R} - i_h \quad (23)$$

式中, v 为车辆行驶速度, R 为圆曲线半径, i_h 为路面坡度。

智能性中车辆偏移车道中心距最大值由传感器数据计算得到, 障碍物、交通标志及信号灯的识别率由传感器识别到的障碍物、交通标志及信号灯数量占总数量的百分比表示, 感知到障碍物的距离是传感器首次感知到障碍物时, 车辆距离障碍物的相对距离。

高效性中任务完成时间为车辆开始避让到完成避让回到稳定行驶状态的时间。

5.2 车辆直道避让场景仿真试验与评价

车辆直道避让场景中包括行人横穿道路场景片段, 非机动车占用机动车道场景片段, 机动车避让场景片段。三个场景片段中无人驾驶车辆均在水平干燥的直道上行驶, 稳定行驶车速为 54 km/h (15 m/s), 道路为非结构化道路, 天气晴朗, 光照良好, 不存在听觉及电磁环境干扰。

行人横穿道路场景片段中, 车辆沿左侧车道稳定行驶, 在车辆距离行人 120 m 时, 行人从右侧道路以 1 m/s 的速度从右向左横穿马路, 如图 6 所示。



图 6 行人横穿道路场景片段

非机动车占用机动车道场景片段中, 车辆沿右侧车道稳定行驶, 在车辆距离非机动车(自行车) 150 m 时, 非机动车在车辆前方沿道路右侧以 4.5 m/s 的速度行驶, 如图 7 所示。



图 7 非机动车占用机动车道场景片段

机动车避让场景片段中, 被测车辆沿左侧车道稳定行驶, 在车辆距离前方车辆 200 m 时, 位于车辆前方的机动车以 30 km/h 的初速度减速行驶至停车, 位于车辆右侧道路的机动车从零逐渐加速行驶至车速为 30 km/h, 如图 8 所示。



图 8 机动车避让场景片段

由于车辆直道避让场景中不存在弯道, 故乘坐舒适性指标中没有横向力系数指标, 表 5 中列出了不同场景中车辆的部分指标值。

表 5 直道避让测试中部分指标值

指标	指标值		
	场景片段 1	场景片段 2	场景片段 3
避让安全距离/m	38.53	44.76	52.91
避让时车速/(m/s)	14.77	14.80	14.83
车速标准差/(m/s)	0.034 7	0.034 2	0.034 5
x 向加速度峰值/(m/s ²)	0.333 4	0.235 1	0.242 2
y 向加速度峰值/(m/s ²)	5.091 9	5.159 8	5.058 8
横摆角速度峰值/(°/s)	42.963 4	48.001 2	42.665 8
车辆偏移中心距最大值/m	0.081 4	0.079 5	0.061 0
感知到障碍物时的距离/m	131.2	175.2	198.5
任务完成时间/s	2.60	4.00	2.65
平均车速/(m/s)	14.818 0	14.818 5	14.818 3

(1) 计算指标权重。利用 CRITIC 法计算指标层的指标权重, 层次分析法计算总指标层的指标权重, 指标权重值如表 6 所示。

表 6 直道避让场景评价指标权重

总指标层指标		权重值	指标层指标	权重值
行驶安全性	0.48		避让安全距离	0.10
			避让时车速	0.24
			车道保持	0.66
无人 驾驶 车辆 评价	乘坐舒适性 0.27		车速标准差	0.24
			x 向加速度峰值	0.21
			y 向加速度峰值	0.26
			横摆角速度峰值	0.29
智能性	0.16		车辆偏移中心距最大值	0.38
			障碍物交通标志识别率	0.34
			感知到障碍物时的距离	0.28
高效性	0.09		任务完成时间	0.45
			平均车速	0.55

(2) 灰色关联理论评价法定量评价。车辆直道避让综合场景中, 行驶安全性指标中避让安全距离与避让时车速指标的最优值依据专家意见, 将避让安全距离的最优值取为 35 m, 避让时车速的最优值取为 10 m/s。乘坐舒适性指标中 y 向加速度峰值与横摆角速度峰值指标存在舒适性临界值, 故 y 向加速度峰值的最优值取 0.12g, 横摆角速度峰值的最优值取 15 rad/s, 其他指标最优值按照指标正负性不同取测试数据中的最大最小值。

利用基于灰色关联理论的评价模型计算得到各指标分值及车辆综合得分, 如表 7 所示。

表 7 车辆综合得分及指标分值

车辆综合得分	总指标	总指标分值	指标	指标分值
77.5	行驶安全性	85	避让安全距离	64
			避让时车速	52
			车道保持	100
	乘坐舒适性	57	车速标准差	98
			x 向加速度峰值	81
			y 向加速度峰值	28
			横摆角速度峰值	32
	智能性	82	车辆偏移中心距最大值	72
			障碍物交通标志识别率	100
			感知到障碍物时的距离	74
	高效性	91	任务完成时间	80
			平均车速	100

(3) 模糊综合评价法定量评价。邀请 20 位智能车及自动驾驶研究专家和 80 位资深驾驶员按照评分标准对指标进行打分, 评分标准及部分专家评分表如表 8、9 所示。

表 8 专家评分标准

评分标准				
好	较好	一般	较差	差
9	7	5	3	1

表 9 直道避让场景部分专家评分表

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	专家 7	专家 8	专家 9	专家 10	...
避让时车速	5	9	7	7	7	5	5	7	7	7	...
避让安全距离	3	9	9	5	7	7	5	7	7	5	...
车道保持	9	7	9	7	5	7	7	5	9	7	...
车速标准差	7	9	7	5	7	7	9	7	7	7	...
x 向加速度峰值	7	7	5	9	7	9	9	7	9	9	...
y 向加速度峰值	5	3	7	1	1	3	7	7	5	5	...
横摆角速度峰值	3	7	1	5	5	3	3	5	5	3	...
车辆偏移中心距最大值	7	9	9	9	7	3	7	9	9	7	...
障碍物交通标志识别率	7	9	9	7	7	9	9	9	7	7	...
感知到障碍物时的距离	9	7	9	7	7	5	7	9	5	7	...
任务完成时间	7	9	7	7	5	5	9	5	7	9	...
平均车速	7	9	7	7	5	5	9	5	7	7	...

模糊综合评价法中由专家评分表得到隶属度评价矩阵, 结合指标权重和式(19)~(21)计算得到总指标层各指标分值及车辆综合得分, 灰色关联评价法与模糊综合评价法的计算结果见表 10。

表 10 两种评价方法计算结果

指标	直道避让场景	
	灰色关联评价法	模糊综合评价法
乘坐舒适性	57	67
智能性	82	86
高效性	91	79
行驶安全性	85	80
车辆综合得分	77.5	77

5.3 试验分析与两种评价方法比较

观察计算结果, 车辆的车速标准差和 x 向的加速度峰值均较小, 满足舒适性要求; 但 y 向加速度峰值和横摆角速度峰值远超舒适性临界值, 说明车辆在避让过程中的乘坐舒适性有待提高。车辆在直道稳定状态行驶时, 车辆偏移中心距最大值很小, 说明车辆能正确识别车道线; 车辆能提前感知到行人、非机动车、机动车并在发生碰撞前采取了避让措施, 且能在较短的时间内完成避让, 试验过程中始终保持较高的行驶车速, 符合智能性和高效性要求。利用灰色关联理论评价方法对乘坐舒适性、智能性和高效性评价过程中, 舒适性临界值是客观确定的, 智能性和高效性指标最优值均取自测试数据, 无主观因素的影响, 而模糊综合评价法中指标分数由专家打分确定, 有较强的主观影响。

行驶安全性方面, 通过观察车辆在仿真试验中的行驶状态并分析车辆行驶安全性指标值可知, 无人驾驶车辆在测试过程中未发生碰撞, 能准确沿车道线行驶, 车道保持良好; 并且能正确识别障碍物并成功避让, 避让安全距离虽大于专家给出的最优值, 也符合行驶安全性要求; 但避让时车速过大会影响车辆的行驶安全性。利用灰色关联理论评价方法对行驶安全性评价过程中, 仅在专家确定避让安全距离、避让时车速两个指标的最优值时存在主观因素影响, 得分与模糊综合评价法中由专家对全部指标打分的主观评价结果有一定差别。

对比灰色关联理论评价方法和模糊综合评价法, 评价结果具有较高的一致性, 但两种评价方法中, 总指标层各指标分值差异较大。在模糊综合评价法中, 由于专家在指标打分和隶属度的确定过程中存在很大的人为主观性, 导致乘坐舒适性和高效性指标得分与灰色关联理论评价方法有一定差异。灰色关联理论评价方法通过计算比较序列与参考序列的差别程度得到指标分值; 其中参考序列由最优值构成, 大部分指标的最优值都由试验数据确定, 小部分由专家给出, 有效降低了评价过程中人为主

观性的影响, 直接利用算法对车辆测试数据处理, 自动化地完成无人驾驶车辆定量评价。由于该方法不需要大量专家的参与, 在实际应用中能有效降低企业对无人驾驶车辆进行测试评价的成本。

6 结论

本文从测试内容和测试环境两方面完成无人驾驶车辆测试场景的设计, 建立了车辆评价指标体系, 通过基于 CRITIC 法的灰色关联理论评价方法, 对无人驾驶车辆进行评价。该方法一方面利用 CRITIC 客观赋权法确定评价指标层的指标权重, AHP 法确定总指标层的指标权重, 降低了评价指标权重的主观性; 另一方面通过对灰色关联理论评价模型中参考序列最优值的选取, 发挥了灰色关联分析法对底层指标的客观描述的优势, 两者的结合使得该方法对各级评价指标的量化分析更加科学合理, 无人驾驶车辆的定量评价结果更加客观, 为后续无人驾驶车辆技术的改进提供可靠参考。

参 考 文 献

- [1] 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. Development status and trend of intelligent internet-connected vehicle (ICV) technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy Conservation, 2017, 8(1): 1-14.
- [2] 孙扬. 无人驾驶车辆智能水平的定量评价[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
SUN Yang. Quantitative evaluation of intelligence level of driverless vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [3] 李凤娇. 无人驾驶车辆综合避障行为研究与评价[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
LI Fengjiao. Research and evaluation of integrated obstacle avoidance behavior of driverless vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [4] 董芳. 弯道驾驶行为研究及无人驾驶车辆智能行为评价[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
DONG Fang. Research on curve driving behavior and intelligent behavior evaluation of driverless vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [5] ZHANG C, LIU Y, ZHAO D, et al. Roadview: A traffic scene simulator for autonomous vehicle simulation testing[C]// International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2014.
- [6] ZHAO D, LIU Y, ZHANG C, et al. Autonomous driving simulation for unmanned vehicles[C/CD]// Proceedings IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV, 2015.
- [7] SAE International. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles[S]. Warrendale: SAE International, 2018.
- [8] PIERZCHAK M, GIGUERE P, ASTRUP R. Mapping of forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 217-225.
- [9] 孙扬, 陈慧岩. 无人地面车辆测评体系研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(6): 978-986.
SUN Yang, CHEN Huiyan. Research on test and evaluation of unmanned ground vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(6): 978-986.
- [10] MENG K, ZHAO Y, GAO L, et al. Evaluation of the intelligent behaviors of unmanned ground vehicles based on OD information theory[C]// CICTP 2015. Beijing. 2015: 410-419.
- [11] 李静, 唐振民, 谭业发, 等. 无人地面车辆自主性评价指标体系研究[J]. 微型机与应用, 2016, 35(2): 66.
LI Jing, TANG Zhenmin, TAN Yefa, et al. Research on autonomous evaluation index system of unmanned ground vehicle[J]. Microcomputers and Applications, 2016, 35(2): 66.
- [12] 张昕. 无人车通过特殊区域智能行为评价研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
ZHANG Xin. Research on autonomous vehicle intelligent behavior evaluation through special area[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [13] WANG Y, LIU J. Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems[J]. Chinese Sciences Bulletin, 2012, 57(26): 3409-3418.
- [14] 黎峰, 朱道文. 行车舒适性评价方法[J]. 科技风, 2014(3): 67.
LI Feng, ZHU Daowen. Evaluation method of driving comfort[J]. Science and Technology Wind, 2014(3): 67.
- [15] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2010.
LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng, et al. Grey system theory and its application[M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2010.

- [16] YANG S, XIONG G, CHEN H. A cost function-oriented quantitative evaluation method for unmanned ground vehicles[J]. *Advanced Materials Research*, 2011: 701-706.
- [17] 杨贺. 无人驾驶车辆智能水平分析及评价[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- YANG He. Analysis and evaluation of intelligence level of driverless vehicles[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [18] 宋传平, 施红星, 齐玉梅. 基于灰色关联分析的车辆交通事故规律研究[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(8): 40-43.
- SONG Chuanping, SHI Hongxing, QI Yumei. Research on the law of vehicle traffic accidents based on grey correlation analysis[J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(8): 40-43.
- [19] 兰砚军. 基于模糊评价法高校学生信用等级评价模型[J]. *电大理工*, 2013(3): 35-36.
- LAN Yanjun. College student credit rating evaluation model based on fuzzy evaluation method[J]. *Study of Science and Engineering at RTVU*, 2013(3): 35-36.

作者简介: 魏子茹, 女, 1996 年出生。主要研究方向为无人驾驶车辆测试评价。

E-mail: weizr18@mail.jlu.edu.cn

王鹏宇(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为智能网联。

E-mail: 16907977@qq.com