

基于组合赋权云模型的自动驾驶安全综合评价研究

詹媛媛¹, 周金明^{2*}

1. 安徽信息工程学院 通识教育与外国语学院, 安徽 芜湖 241000

2. 安徽工程大学 数理与金融学院, 安徽 芜湖 241000

DOI:10.61369/ASDS.2026060007

摘 要 : 自动驾驶安全已成为汽车制造、科技与半导体等行业亟待突破的关键议题。为建立科学、全面的自动驾驶安全评价体系, 文章构建了涵盖“感知系统、决策与规划、系统安全性与可靠性、人机交互、数据与伦理”五个维度的综合评价指标体系, 综合运用层次分析法(AHP)确定主观权重、CRITIC法确定客观权重, 并借助博弈论实现主客观权重的优化融合, 从而克服了单一赋权方法的局限性。进一步引入云模型理论, 将定性评价中的模糊性与随机性转化为定量分析。最后, 通过典型自动驾驶系统的案例进行实证分析, 验证了该方法的有效性与科学性, 为自动驾驶系统的安全水平提供了稳定、科学的综合评价。

关 键 词 : 自动驾驶安全; 博弈论; 组合赋权; 云模型

Combined Weighting and Cloud Model Based Comprehensive Safety Evaluation of Autonomous Driving

Zhan Yuanyuan¹, Zhou Jinming^{2*}

1.School of General Education and Foreign Languages, Anhui Institute of Information Technology, Wuhu, Anhui 241000

2.School of Mathematics-Physics and Finance, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000

Abstract : Autonomous driving safety has become a critical issue requiring urgent breakthroughs in industries such as automotive manufacturing, technology, and semiconductors. To establish a scientific and comprehensive safety evaluation system for autonomous driving, this paper constructs a comprehensive evaluation index system covering five dimensions: "perception system, decision-making and planning, system safety and reliability, human-machine interaction, data and ethics." The Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to determine subjective weights, and the CRITIC method is employed to calculate objective weights. By leveraging game theory, an optimal integration of subjective and objective weights is achieved, thereby overcoming the limitations of single-weighting methods. Furthermore, cloud model theory is introduced to transform the fuzziness and randomness in qualitative evaluation into quantitative analysis. Finally, empirical analysis is conducted using a typical autonomous driving system as a case study, verifying the effectiveness and scientific validity of the proposed method. This approach provides a stable and scientific comprehensive evaluation of the safety level of autonomous driving systems.

Keywords : autonomous driving safety; game theory; combination weighting; cloud model

引言

在现代科技持续突破的背景下, 自动驾驶技术早已从科幻走进现实, 逐步落地为真实可应用的技术形态。通过高精度传感器、计算机视觉与人工智能等核心技术, 自动驾驶系统可实现对周边行驶环境的实时感知, 及时完成动态决策并控制车辆运动来

实现自动驾驶^[1]。目前, 根据《汽车驾驶自动化分级》国家标准, 自动驾驶从L0到L5分为6个等级^[2], 每个等级的具体划分如表1所示:

基金项目: 国家社会科学基金(20BTJ048); 安徽省“四新”研究与改革实践项目(2024SX083); 安徽工程大学中青年拔尖人才培养计划(S022021054, S022022012); 研究生教育教学改革研究项目(2023YZL057); 安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类)(2024AH050643); 安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类)(2025AHGXZK30969)。

作者简介: 詹媛媛, 安徽信息工程学院通识教育与外国语学院, 助教, 研究方向为云模型理论与方法应用。

通讯作者: 周金明, 安徽工程大学数理与金融学院, 教授, 研究生导师, 研究方向为复杂模糊决策理论。

表1：自动驾驶等级表
Table 1: Autonomous driving level

智驾等级	自动化程度
L0: 无自动化	完全由驾驶员操作，系统仅提供警告（如盲区提醒，车辆偏离警告）
L1: 辅助驾驶	系统可以控制车辆的一个功能（如加速或者转向），但驾驶员需全程监控并负责驾驶
L2: 部分自动驾驶	系统可同时控制加速、减速和转向等功能，但驾驶员必须保持警觉并随时接管控制
L3: 有条件自动驾驶	在特定条件下，系统可完全接管驾驶任务，驾驶员无需持续监控，但需要在系统提醒时接管车辆
L4: 高度自动驾驶	系统在特定环境下（如高速公路或特定区域）能够完全自动驾驶，无需驾驶员干预
L5: 完全自动驾驶	系统在所有道路和环境条件下完全自动驾驶，无需驾驶员干预或控制

然而，随着自动驾驶等级不断提升，对自动驾驶技术的安全性进行评估至关重要^[3]。例如，在极端天气、施工路段、非标准道路标识等复杂环境下，系统可能会出现失效或识别错误；驾驶员因过度依赖自动驾驶而放松警惕，导致驾驶技能退化，失去对紧急情况判断的能力。除此之外，自动驾驶会增加数据隐私泄露和被滥用的风险^[4]。因此，安全问题是自动驾驶所面临的不可逾越的核心问题。建立一套科学、全面、量化的安全评价体系，不仅是技术研发迭代的“指挥棒”，也是政府进行监管认证、公众建立技术信任的“基石”。

目前，对自动驾驶安全的评估多采用单一方法（传统的实车测试或单一赋权方式），导致评价视角不够全面、主客观权重失衡、风险模糊性难以充分量化等问题^[5]。为此，本文尝试构建一个覆盖技术、功能、人机交互与伦理层面的多层次自动驾驶安全综合评价体系。主要创新包括：第一，系统整合从感知、决策到人机交互、数据伦理五个维度的指标；第二，提出一种基于博弈论组合赋权的方法，结合层次分析法的主观经验和 CRITIC 法的客观数据，以获取更合理的综合权重；第三，引入云模型理论，量化评估过程中的模糊性和随机性^[6]，从而实现对安全等级更直观、更稳定的判断。该研究不仅有助于突破单一评价方法的局限，也拓展了多属性决策方法在自动驾驶安全领域的应用，为高阶自动驾驶系统中模糊性安全风险的量化提供了新的思路和方法。

一、构建评价指标体系

自动驾驶（也称为无人驾驶）是指通过人工智能、传感器、高精地图和控制系统等技术，让汽车在没有人类驾驶员干预的情况下，自主完成感知环境、规划路径和操控行驶的过程。自动驾驶评价指标体系的构建是一个复杂且系统的工程，为了减少人为失误交通事故的发生；通过优化行驶路线，缓解拥堵，提升道路通行能力；以及平稳的驾驶模式可降低车辆尾气排放，能进一步推动绿色交通发展^[7]。

本文旨在全面、科学、客观地评估影响自动驾驶的安全性和可靠性等关键因素，分别从技术性能、环境感知、系统可靠性以及人机交互等多个维度构建影响车辆自动驾驶安全的指标体系，如图1所示。

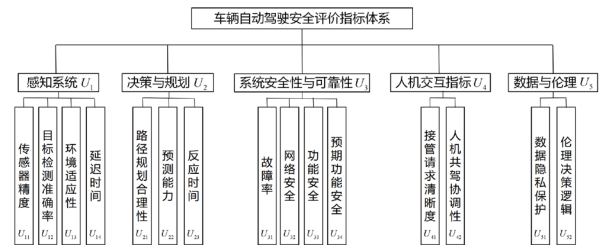


图1：安全评价指标体系

Figure 1: System of safety evaluation index

基于上述总结，构建无人驾驶指标体系是评估和优化自动驾驶系统性能的核心环节，围绕安全、可靠、合规及用户体验，最终形成感知系统、决策与规划、系统安全性与可靠性、人机交互^[8]和数据与伦理5个一级指标；传感器精度、目标检测准确率、环境适应性、延迟时间、路径规划合理性、预测能力、反应时间、故障率、网络安全、功能安全、预期功能安全、接管请求清晰度、人机共驾协调性、数据隐私保护和伦理决策逻辑15个二级指标多维度的车辆自动驾驶安全评价指标体系。

二、研究方法和模型

本文围绕自动驾驶系统的性能评估展开研究，首先依据科学性、针对性、可操作性等原则选取核心评价指标，构建多维度评估体系；进而分别采用层次分析法（AHP）挖掘专家主观判断信息以确定主观权重，借助 CRITIC 法从指标数据本身的波动性与关联性出发计算客观权重；最后引入博弈论思想对主客观权重进行组合优化，形成兼顾主观经验与客观数据特征的综合权重，为自动驾驶系统的性能量化评估提供更为可靠的方法论支持，以期和技术迭代与应用落地提供理论参考。

（一）AHP 法

层次分析法（AHP 法）是一种将复杂决策问题分解为目标层、准则层和方案层，通过两两比较确定权重，最终得出最优方案的主观权重综合决策分析方法^[9]。采用 AHP 法计算评价指标权重的主要步骤如下：

1. 构建层次结构

明确决策目标（如“选择对车辆自动驾驶安全影响最大的评价指标”），梳理评价体系内各因素的关联，搭建层级递进的结

构模型。

2. 构造判断矩阵

多个专家将各个指标相互比较后,使用1~9标度法(如表2所示)标记两个评价指标的相对重要程度,构造比较矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

3. 计算权重与一致性检验

(1) 计算权重:通过“和积法”计算各元素的权重(即同一层次中各元素对上层基准的重要程度占比),每一个因素对于其准则的相对权重计算公式为:

$$\omega_i = \frac{1}{n} \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: ω_i 为因素 i 的指标权重值。

(2) 一致性检验:在构造判断矩阵时,专家对多个指标的重要性的判断容易受主观影响,指标进行风险评估时,为了确保权重计算结果的科学性和可信度,保证判断矩阵是一致的,所以需要对其进行一致性检验,计算公式如下:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中: CR 为一致性比率,若 $CR < 0.1$,说明判断矩阵逻辑一致,权重有效;若 $CR \geq 0.1$,需重新调整两两比较的结果。 CI 为一致性指标,式(4)中, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值, n 为矩阵阶数。 RI 为平均随机一致性指标,可通过标准对照表获取^[10]。

表2: 1~9标度法的含义
Table2: 1~9 Scale method and meaning^[9]

标度	含义
1	两因素相比,因素 <i>i</i> 同因素 <i>j</i> 同样重要
3	两因素相比,因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 稍微重要
5	两因素相比,因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 显著重要
7	两因素相比,因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 非常重要
9	两因素相比,因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 极其重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值
倒数	<i>i</i> 和 <i>j</i> 相比,如果标度为3,则 <i>i</i> 和 <i>j</i> 相比就是1/3

(二) CRITIC 法

CRITIC 法是一种客观赋权法,用于多指标评价体系中确定各指标的权重,核心是通过指标的对比值(数据差异程度)和冲突性(指标间相关程度)综合计算权重,对比值越大、冲突性越强,则指标权重越大^[11]。CRITIC 法是完全基于数据客观计算,同时考虑指标的数据差异与信息重叠,避免了单一赋权的偏差,能更精确反映各指标的实际贡献度,其具体步骤如下^[12]:

1. 数据标准化

构建数据矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$, 其中 x_{ij} 表示第 i 个样本第 j 项评价指

标的数值 ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)。为消除因量纲不同对评价结果造成的影响,对数据进行正向化或逆向化处理,标准化处理后的数据为 x'_{ij} 。

正向化处理:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (5)$$

逆向化处理:

$$x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (6)$$

2. 计算指标对比度

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}}, \quad \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m x_{ij}. \quad (7)$$

其中 σ_j 表示 j 项评价指标的标准差。从指标特性来看,标准差的大小与数据差异度正相关:标准差越大,意味着该指标的样本数据离散程度越高,越能反映出更多的信息,说明评价力度也就越强,故而在权重设置中需要给予其更大的比重。

3. 计算指标冲突性

$$C_j = \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}). \quad (8)$$

$$I_j = \sigma_j \times C_j. \quad (9)$$

式中: C_j 表示指标冲突性; r_{ij} 表示评价指标之间的相关系数, $1 - r_{ij}$ 越大,指标 j 和 j 的冲突性越强,信息重叠越少; I_j 为指标信息量。

4. 计算权重

$$\omega_j = \frac{I_j}{\sum_{j=1}^n I_j}. \quad (10)$$

(三) 博弈论组合赋权

博弈论组合赋权法是一种基于博弈论思想,对主观赋权法和客观赋权法得到的权重向量进行协调优化,最终得到综合权重的方法^[13]。通过权重之间的“博弈均衡”,实现主客观权重的最优组合。具体步骤如下^[14]:

1. 确定基础权重向量集

分别采用 AHP 和 CRITIC 计算出同一评价指标体系下的初始权重的线性组合:

$$W_k = [\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}], \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (11)$$

式中: W_k 为第 k 种方法确定的权重集合, n 为评价指标的数量, L 为确定权重的方法数量。

2. 构建组合权重模型

设组合权重向量为 ω , 将其表示为初始权重的线性组合:

$$\omega = \sum_{k=1}^L \alpha_k W_k^T \quad (12)$$

ω 为组合权重向量； α_k 为对应的线性组合系数， $\alpha_k > 0$ ； W_k^T 为向量集的转置矩阵。

3. 建立博弈均衡目标函数

为使组合权重与各初始权重的偏差最小，构建极小化偏差的目标函数：

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \alpha_k W_k^T - W_i^T \right\|_2, \quad i, k = 1, 2, \dots, L \quad (13)$$

式中： $\sum_{k=1}^L \alpha_k W_k^T$ 表示为某种权重的线性组合； W_i^T 为第 i 种方法确定的权重向量转置； $\|\cdot\|_2$ 为范数。将式 (13) 根据微分的性质展开，得到线性方程组 (14)。

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T & \cdots & \omega_1 \omega_L^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T & \cdots & \omega_2 \omega_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_L \omega_1^T & \omega_L \omega_2^T & \cdots & \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \\ \vdots \\ \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

求解得出最优组合系数 $\alpha^* = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ 。

4. 求解组合系数并归一化

在上述求得最优组合系数之后，进行归一化处理，确保 $\sum_{k=1}^L \alpha_k = 1$ 。

$$\alpha_k^* = \frac{|\alpha_k|}{\sum_{k=1}^L |\alpha_k|} \quad (15)$$

5. 计算最终综合权重

将归一化后的组合系数代入式 (12)，计算得到最终的博弈论组合权重向量^[14]。

$$\omega = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* \omega_k^T \quad (16)$$

三、基于云模型的综合评价方法

云模型^[15]是一种实现定性概念与定量数值之间不确定性转换的数学模型，核心是融合模糊性与随机性，解决传统模糊理论忽略随机性、概率论难以处理模糊语义的问题。目前，云模型广泛应用于不确定性评价、决策分析、模式识别等领域，比如多属性指标重要性排序、风险评估、图像识别等场景。

云模型适用于自动驾驶安全性影响指标的评估，是因为自动驾驶的指标评价本身带有模糊性（“较安全”、“相对可靠”这类定性描述无明显边界）和随机性（同一指标在不同路况和不同天气下的表现存在波动），而云模型能同时刻画这两种不确定性，比传统的确定性方法更贴合实际。自动驾驶的影响指标体系复杂且存在耦合关系，云模型可通过多概念云的叠加、对比分析，只管呈现不同指标的影响程度差异，为多属性决策提供清晰的可视化依据。云模型计算步骤如下^[16]：

（一）确定评语集与标准云

首先根据构建的评价指标体系建立评语集，通过标准云将评语集进行量化，把评价等级划分为 h 个区间。其中，第 i 个子区间 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ 所对应的标准云数字特征为 (Ex_i, En_i, He) ，具体转换公式如下^[14]：

$$\begin{cases} Ex_i = \frac{x_i^{\min} + x_i^{\max}}{2} \\ En_i = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{6} \\ He = \frac{En_i}{10} \end{cases} \quad (17)$$

式中， $x_i^{\min}$ 和 $x_i^{\max}$ 分别为该评价子区间中的最大值和最小值； k 为常数，根据评价指标的不确定性进行选取，一般取值在 0.001~0.1 之间。

（二）确定评价指标云及综合评价云^[17]

邀请自动驾驶行业技术专业性强、实践经验丰富、领域覆盖度广的 m 个专家，依据划分的风险评价等级对二级评价指标进行打分，汇总得到专家评分矩阵 Z 。

$$Z = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中， x_{ij} 表示第 i 个专家对第 j 个二级指标的评价值。然后，利用逆向云发生器计算二级指标的云数字特征，公式如下：

$$\begin{cases} Ex_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \\ En_j = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_{ij} - Ex_j| \\ S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - Ex_j)^2 \\ He_j = \sqrt{|S_j^2 - En_j^2|} \end{cases} \quad (19)$$

（三）确定评价等级，得到评价结果

根据上述所得指标的云数字特征和指标权重，计算可得综合评价云的数字特征，计算公式如下^[18]：

$$\begin{cases} Ex = \sum_{j=1}^n \omega_j Ex_j \\ En = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j En_j^2} \\ He = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j He_j^2} \end{cases} \quad (20)$$

式中， n 为指标个数， ω_j 为第 j 个指标的权重， (Ex_j, En_j, He_j) 为指标云数字特征。

将综合云数字特征输入到正向云发生器得到综合评价云图，并于标准云图进行比较，即可确定评价等级。

四、实证分析

（一）实例概况

以某 L3 级自动驾驶系统为研究对象^[19]，围绕其安全运行能力构建多维度评价体系，通过实地测试、数据采集与量化分析相结合的方式，对该 L3 级自动驾驶系统的安全性能进行全面测度，旨在验证所构建评价体系的科学性与适用性，为 L3 级自动驾驶系统的安全优化与行业标准制定提供实证依据。

邀请 10 位自动驾驶行业技术专业性强、实践经验丰富、领域覆盖度广的专家结合专业知识以及实际情况比较自动驾驶安全的影响因素，并对其影响程度进行打分。对数据进行处理后，运用组合赋权法得到各级指标的综合权重。

（二）评价指标权重确定

1. 层次分析法计算主观权重

邀请专家采用 1-9 标度法进行两两比较，构造判断矩阵，并利用式（1）-式（4）计算得到一级评价指标的主观权重，如表 3 所示：

表 3：一级指标判断矩阵表
Table 3: Judgment matrix of first-level indicators

	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	ω_i
U_1	1	3	1/2	2	2	0.254
U_2	1/3	1	1/3	1	2	0.139
U_3	2	3	1	3	2	0.363
U_4	1/2	1	1/3	1	1	0.122
U_5	1/2	1/2	1/2	1	1	0.122
CR_1	$CR=0.040<0.100$					

一致性检验结果： $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5.178 - 5}{5 - 1} = 0.045$ 。

$n=5$ 矩阵的平均随机一致性指标^[10]： $RI=1.120$ 。

随机一致性比率： $CR = \frac{CI}{RI} = 0.040 < 0.100$ ，通过一致性检验。

同样得到二级指标感知系统 U_1 的计算结果，如表 4 所示：

表 4：感知系统 U_1 判断矩阵表
Table 4: Judgment matrix of perception system U_1

	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	ω_i
U_{11}	1	2	1/3	3	0.233
U_{12}	1/2	1	1/4	2	0.140
U_{13}	3	4	1	5	0.542
U_{14}	1/3	1/2	1/5	1	0.085
CR_2	$CR=0.019<0.100$				

一致性检验结果： $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.051 - 4}{4 - 1} = 0.017$ 。

$n=4$ 矩阵的平均随机一致性指标： $RI=0.890$ 。

随机一致性比率： $CR = \frac{CI}{RI} = 0.019 < 0.100$ ，通过一致性检验。

二级指标决策与规划 U_2 的计算结果，如表 5 所示：

表 5：决策与规划 U_2 判断矩阵表
Table 5: Judgment matrix of decision-making and planning U_2

	U_{21}	U_{22}	U_{23}	ω_i
U_{21}	1	3	5	0.633
U_{22}	1/3	1	3	0.260
U_{23}	1/5	1/3	1	0.106
CR_3	$CR=0.037<0.100$			

一致性检验结果： $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.038 - 3}{3 - 1} = 0.019$ 。

$n=3$ 矩阵的平均随机一致性指标： $RI=0.520$ 。

随机一致性比率： $CR = \frac{CI}{RI} = 0.037 < 0.100$ ，通过一致性检验。

二级指标系统安全性与可靠性 U_3 的计算结果，如表 6 所示：

表 6：安全性与可靠性 U_3 判断矩阵表
Table 6: Judgment matrix of safety and reliability U_3

	U_{31}	U_{32}	U_{33}	U_{34}	ω_i
U_{31}	1	1/3	1/4	1/5	0.074
U_{32}	3	1	1/2	1/3	0.171
U_{33}	4	2	1	1/2	0.284
U_{34}	5	3	2	1	0.471
CR_4	$CR=0.01940<0.100$				

一致性检验结果： $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.051 - 4}{4 - 1} = 0.017$ 。

$n=4$ 矩阵的平均随机一致性指标： $RI=0.890$ 。

随机一致性比率： $CR = \frac{CI}{RI} = 0.019 < 0.100$ ，通过一致性检验。

二级指标人机交互 U_4 的计算结果，如表 7 所示：

表 7：人机交互 U_4 判断矩阵表
Table 7: Judgment matrix of human-machine interaction U_4

	U_{41}	U_{42}	ω_i
U_{41}	1	3	0.750
U_{42}	1/3	1	0.250
CR_5	$CR=0<0.100$		

对于 2 阶判断矩阵（ $n=2$ ），自动满足一致性。二级指标数据与伦理 U_5 的计算结果，如表 8 所示：

表 8：数据与伦理 U_5 判断矩阵表
Table 8: Judgment matrix of data and ethics U_5

	U_{51}	U_{52}	ω_i
U_{51}	1	2	0.667
U_{52}	1/2	1	0.333
CR_6	$CR=0<0.100$		

层次分析法结果如表 9 所示：

表 9：层次分析法权重计算结果汇总
Table 9: Summary of weight calculation results by AHP

一级指标	权重	二级指标	权重	最终权重
感知系统 (U_1)	0.254	传感器精度 (U_{11})	0.233	0.059
		目标检测准确率 (U_{12})	0.140	0.035
		环境适应性 (U_{13})	0.542	0.138
		延迟时间 (U_{14})	0.085	0.022
决策与规划 (U_2)	0.139	路径规划合理性 (U_{21})	0.633	0.088
		预测能力 (U_{22})	0.260	0.036
		反应时间 (U_{23})	0.106	0.015
		故障率 (U_{31})	0.074	0.027
系统安全性 与可靠性 (U_3)	0.363	网络安全 (U_{32})	0.171	0.062
		功能安全 (U_{33})	0.284	0.103
		预期功能安全 (U_{34})	0.471	0.171
		接管请求清晰度 (U_{41})	0.750	0.092
人机交互指 标 (U_4)	0.122	人机共驾协调性 (U_{42})	0.250	0.031
		数据隐私保护 (U_{51})	0.667	0.081
数据与伦理 (U_5)	0.122	伦理决策逻辑 (U_{52})	0.333	0.041

2.CRITIC 法计算客观权重

首先，对车辆自动驾驶的评价指标标准化处理。其中，自动驾驶车辆的15个评价指标中延迟时间、反应时间和故障率为负向指标，其余均为正向指标，最终得到数据的标准化处理结果如表10所示：

表10：数据标准化处理结果

Table 10: Results of data standardization processing

系统指标	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
U_{11}	1.000	0.811	0.378	0.135	0.622	0.541	0.730	0.000
U_{12}	0.795	1.000	0.409	0.114	0.705	0.568	0.727	0.000
U_{13}	1.000	0.524	0.755	0.204	0.633	0.449	0.673	0.000
U_{14}	1.000	0.814	0.571	0.214	0.671	0.429	0.614	0.000
U_{21}	1.000	0.367	0.929	0.173	0.561	0.500	0.755	0.000
U_{22}	0.929	1.000	0.571	0.262	0.726	0.536	0.786	0.000
U_{23}	1.000	0.643	0.714	0.214	0.571	0.429	0.786	0.000
U_{31}	0.162	1.000	0.723	0.000	0.523	0.823	0.392	0.038
U_{32}	1.000	0.303	0.545	0.894	0.197	0.000	0.652	0.818
U_{33}	1.000	0.000	0.233	0.933	0.433	0.067	0.667	0.800
U_{34}	1.000	0.416	0.650	0.153	0.504	0.299	0.693	0.000
U_{41}	0.924	0.456	1.000	0.177	0.608	0.418	0.835	0.000
U_{42}	0.955	0.466	1.000	0.216	0.625	0.523	0.830	0.000
U_{51}	1.000	0.000	0.560	0.980	0.430	0.300	0.770	0.890
U_{52}	0.787	0.080	0.413	1.000	0.227	0.000	0.600	0.893

将标准化后的数据用 CRITIC 法计算得到各指标的客观权重和标准差^[20-21]。计算结果如表11所示：

表11：指标层 CRITIC 权重计算结果

Table 11: CRITIC weight calculation results of the index layer

项	指标变异性 σ_j	指标冲突性 C_j	信息量 I_j	权重 ω_i
U_{11}	0.340	7.182	2.441	0.050
U_{12}	0.344	8.614	2.966	0.061
U_{13}	0.315	6.011	1.896	0.039
U_{14}	0.321	6.683	2.144	0.044
U_{21}	0.352	6.444	2.268	0.047
U_{22}	0.338	7.491	2.529	0.052
U_{23}	0.322	5.890	1.894	0.039
U_{31}	0.374	13.914	5.205	0.107
U_{32}	0.357	13.003	4.640	0.095
U_{33}	0.390	13.747	5.366	0.110
U_{34}	0.320	5.703	1.826	0.038
U_{41}	0.358	6.531	2.335	0.048
U_{42}	0.352	6.583	2.316	0.048
U_{51}	0.358	14.003	5.009	0.103
U_{52}	0.379	15.438	5.851	0.120

3. 博弈论组合赋权

上述计算中，AHP 法计算的主观权重和 CRITIC 法计算的客观权重，结果明显存在偏差。为了有效平衡主观偏好的片面性与客观数据的偶然性，采用博弈论确定主客观权重组合的最优组合系数，计算最终得出纳什均衡解： $a_1=0.6245$ 和 $a_2=0.3755$ 。最终确定各指标的综合权重如表12所示：

表12：一级指标、二级指标的综合权重

Table 12: Comprehensive weights of first-level and second-level indicators

一级指标	主观权重	客观权重	综合权重	二级指标	主观权重	客观权重	综合权重
感知系统 (U_1)	0.254	0.194	0.231	传感器精度 (U_{11})	0.059	0.050	0.056
				目标检测准确率 (U_{12})	0.035	0.061	0.045
				环境适应性 (U_{13})	0.138	0.039	0.101
				延迟时间 (U_{14})	0.022	0.044	0.030
决策与规划 (U_2)	0.139	0.137	0.138	路径规划合理性 (U_{21})	0.088	0.047	0.072
				预测能力 (U_{22})	0.036	0.052	0.042
				反应时间 (U_{23})	0.015	0.039	0.024
				故障率 (U_{31})	0.027	0.107	0.057
系统安全性与可靠性 (U_3)	0.363	0.350	0.358	网络安全 (U_{32})	0.062	0.095	0.075
				功能安全 (U_{33})	0.103	0.110	0.106
				预期功能安全 (U_{34})	0.171	0.038	0.121
				接管请求清晰度 (U_{41})	0.092	0.048	0.075
人机交互指标 (U_4)	0.122	0.096	0.112	人机共驾协调性 (U_{42})	0.031	0.048	0.037
				数据隐私保护 (U_{51})	0.081	0.103	0.089
				伦理决策逻辑 (U_{52})	0.041	0.120	0.071
数据与伦理 (U_5)	0.122	0.223	0.160				

(三) 综合评价云模型

1. 标准云图绘制及区间确定^[22]

根据指标的相对重要性，假设有效论域的范围是 [60,100]，将

评价等级分为四个等级，具体划分如表13所示，其中分值越高，代表该指标对自动驾驶安全的重要性越大。根据评价标准等级的特征参数，绘制得到标准云图，如图2所示：

表 13: 评价标准等级划分

Table 13: Classification of evaluation standard grades

评语集	对应区间	特征参数
低重要性 (LI)	[60,70)	(65,1.667 0.100)
中等重要性 (MI)	[70,80)	(75,1.667 0.100)
高重要性 (HI)	[80,90)	(85,1.667 0.100)
极高重要性 (VHI)	[90,100)	(95,1.667 0.100)

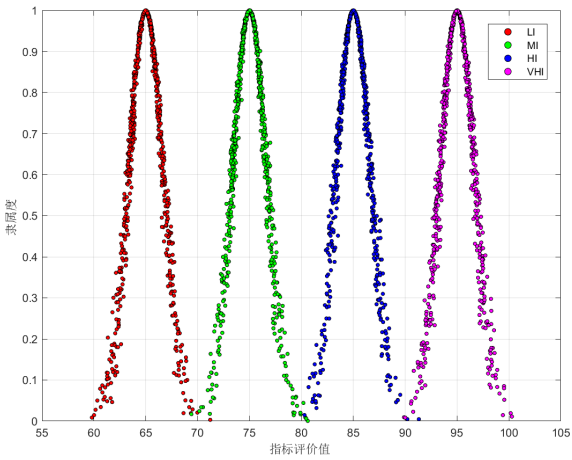


图 2: 标准云图

Figure 2: Graph of standard cloud

2. 评价指标云

为了更加直观的呈现影响自动驾驶安全指标的评价等级, 根据计算所得一级指标的数字特征^[14], 生成综合评价云如图3-7所示:

表 14: 一级指标数字特征

Table 14: Numerical characteristics of first-level indicators

一级指标	数字特征	重要性等级
U_1	(85.446,3.028,0.774)	偏高重要性
U_2	(87.343,3.373,0.900)	偏高重要性
U_3	(92.028,3.292,0.910)	偏极高重要性
U_4	(82.088,3.468,0.946)	高重要性与中等重要性之间
U_5	(82.238,3.356,0.892)	高重要性与中等重要性之间

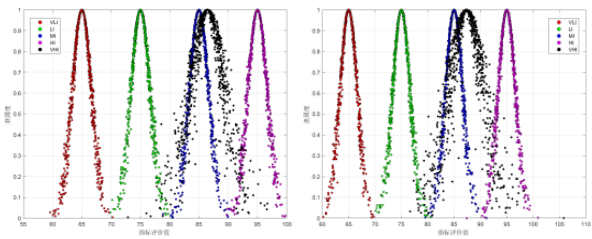


图 3: 感知系统评价云图

Figure 3: Evaluation cloud graph of perception system

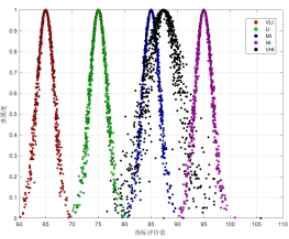


图 4: 决策与规划评价云图

Figure 4: Evaluation cloud graph of decision-making and planning

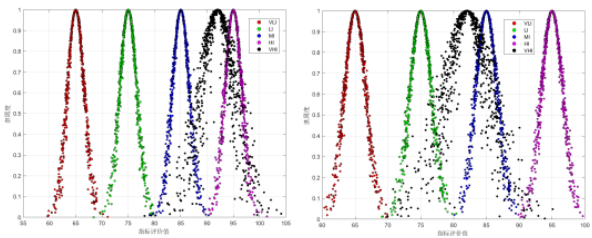


图 5: 系统安全性与可靠性评价云图

Figure 5: Evaluation cloud graph of system safety and reliability

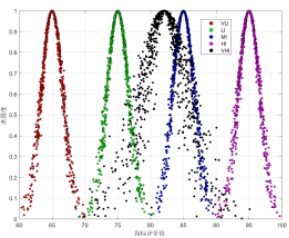


图 6: 人机交互评价云图

Figure 6: Evaluation cloud graph of human-machine interaction

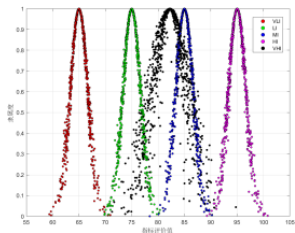


图 7: 数据与伦理评价云图

Figure 7: Evaluation cloud graph of data and ethics

由一级指标数字特征以及评价云图可知, 5个一级指标对自动驾驶系统的重要性排序如下: $U_3 \succ U_2 \succ U_1 \succ U_5 \succ U_4$ 。说明系统安全性与可靠性对自动驾驶影响最大, 该指标主要反映了系统故障率、网络安全、功能安全和预期功能安全。实际情况中, 系统安全性与可靠性同样在自动驾驶中重要性最大, 属于自动驾驶的安全基石。因为该指标的核心就是保障驾驶安全, 避免交通事故, 获取公众信任。因此, 研发自动驾驶系统时, 应注重增强对该项指标的研发力度与要求。

决策与规划和感知系统对自动驾驶的影响几乎相同, 都具有高重要性。当汽车自动驾驶时, 感知能力的大小直接定义了自动驾驶的运行设计域, 说明感知是决策的基础, 决策是对执行命令的输出。一旦感知失效, 系统将面临灾难的安全隐患。数据与伦理和人机交互指标在自动驾驶中的重要性大致相同。数据与伦理定义了法律和道德边界, 使自动驾驶系统在紧急情况下的决策涉及到生命价值的权衡。当自动驾驶由条件自动驾驶升级到完全自动驾驶时, 人机交互指标影响性相对于其它四个指标时, 重要性就会削弱。

五、结束语

文章通过融合 AHP、CRITIC 与博弈论的组合赋权法, 并引入云模型, 构建了一套科学平衡主客观信息的自动驾驶性能评价体系。主要特点如下:

(一) 围绕影响自动驾驶性能的核心指标展开系统评价

首先, 采用层次分析法 (AHP) 对各指标进行主观赋权, 反映专家经验与行业判断; 其次, 引入 CRITIC 法计算客观权重, 体现数据本身的变异性与冲突性; 最后, 基于博弈论组合赋权方法, 确定主客观权重融合的最优系数, 实现了主客观信息的平衡与权重分配的合理化。在实证分析阶段, 引入云模型以刻画评价过程中的模糊性与随机性, 实现定性认知与定量数值之间的映射, 并通过云图的可视化表达, 直观呈现评价结果的分布特性与稳定程度, 为自动驾驶系统性能的综合评估提供了新的方法论支撑。

(二) 构建的评价体系与技术路径具备较强的现实应用价值, 可直接服务于自动驾驶车辆的研发测试、准入评估及运维优化

通过系统量化感知系统可靠性、决策逻辑合理性、网络安全防护水平等关键性能指标的安全水平, 可为整车企业提供精准的技术提升方向; 为监管机构提供统一、量化的测评工具, 助力

破解当前行业面临的“测试资源不足、评估能力不匹配”等瓶颈问题。同时，该体系还可为消费者提供直观易懂的安全性能参考，提升公众对自动驾驶技术的认知与信任，从而推动自动驾驶产业向安全、高效、可持续的方向发展。

（三）尽管自动驾驶技术已取得长足进展，L5级完全自动驾驶仍面临诸多深层次挑战

首先是如何有效应对长尾分布的现实场景，包括极端天气条件、突发交通事件以及复杂的非结构化道路环境，这些都对感知

系统的鲁棒性与决策系统的泛化能力提出了更高要求。其次，如何在风险不可避免的情境下设计优先级避让策略，使系统能够遵循“最小伤害原则”进行自主决策，不仅涉及技术层面的路径规划与控制策略，更深层牵涉法律规制、道德伦理、社会接受等多维复杂议题。这需要政府、科研机构与产业界形成合力，从法规建设、技术攻关与伦理框架等多方面协同推进，为完全自动驾驶时代的真正到来奠定基础。

参考文献

[1] 朱冰, 范天昕, 赵文博等. 自动驾驶汽车连续测试场景复杂度评估方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2025, 55(02): 456-467.

[2] 全国汽车标准化技术委员会 (SAC/TC 114). 汽车驾驶自动化分级: GB/T 40429-2021[S]. 中国标准出版社, 2021.

[3] 王春雨. 汽车自动驾驶技术安全性多维度评估研究 [J]. 汽车测试报告, 2025, (14): 82-84.

[4] 刘权. 自动驾驶风险及其包容审慎监管 [J]. 河北学刊, 2025, 45(04): 25-33.

[5] 赵维伟. F 公司自动驾驶汽车开发项目安全风险管理研究 [D]. 吉林大学, 2025.

[6] ZHOU Jinming, BALEZENTIS T, STREIMIKIENE D. Normalized Weighted Bonferroni Harmonic Mean-Based Intuitionistic Fuzzy Operators and Their Application to the Sustainable Selection of Search and Rescue Robots[J]. Symmetry, 2019, 11(2): 218-241.

[7] 王媛媛. 考虑不确定性的无人驾驶汽车轨迹规划算法研究 [D]. 吉林大学, 2021.

[8] WAYTZ A, HEAFNER J, EPLEY N. The mind in the machine: Anthropomorphism increases trust in an autonomous vehicle[J] Journal of Experimental Social Psychology, 2014, 52: 113-117.

[9] 杨戟, 杨树清, 范颖等. 基于正态云组合赋权-TOPSIS-灰色关联法的加工中心可靠性分配 [J]. 机床与液压, 2025, 53(10): 30-39.

[10] 吴靖. Y 公司智能驾驶项目风险评价及策略研究 [D]. 安徽理工大学, 2025.

[11] 周晓晖, 王萱, 黄兰. 电动汽车制造企业供应链韧性评价研究-基于组合赋权-云模型 [J]. 中国物价, 2024, (07): 47-51+57.

[12] 李姗姗, 周弘毅. 基于 CRITIC-云模型的石化行业节能减排技术评价 [J]. 河北科技大学学报, 2025, 46(01): 108-118.

[13] 邓乐乐, 郭生练, 王俊等. 基于博弈论-云模型的湖北省汉江中下游地区水资源承载力评价 [J]. 水资源保护, 2025, 41(02): 200-208.

[14] 郭国强, 牛智奇, 李亚超等. 综合最优赋权和云模型的导引头方案优选方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(09): 3011-3021.

[15] LI Deyi. Artificial Intelligence with Uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. 171-177.

[16] ZHOU Jinming, ZHAN Yuanyuan, CHEN Sibao. Multi-Dimensional Cloud Model-Based Assessment and Its Application to the Risk of Supply Chain Financial Companies[J]. International Journal of Fuzzy System Applications (IJFSA), 2024, 13(1): 1-29.

[17] 王金花. 基于云模型的 LR 高速公路 5 标段工程施工安全风险评价 [D]. 江西理工大学, 2024.

[18] 苏为华, 周金明. 基于云理论的统计信息质量评估方法研究 [J]. 统计研究, 2018, 35(04): 86-93.

[19] 林庆峰, 王兆杰, 鲁光泉. L3 级自动驾驶汽车的接管安全性评价模型 [J]. 汽车工程, 2019, 41(11): 1258-1264.

[20] 石古乐, 张玉召, 常金盛等. 基于云模型的动力锂电池铁路运输风险评估 [J/OL]. 铁道标准设计, 1-10.

[21] 刘熙. 基于博弈-可拓云模型的石家庄市轨道交通与常规公交换乘服务评价研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2023.

[22] PENG Bo, ZHOU Jinming, PENG Dinghong. Cloud model based approach to group decision making under uncertain pure linguistic information[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2017, 32(3): 1959-1968.