

# 基于AHP的车路协同系统综合测评方法及实证研究

牛皖豫<sup>1\*</sup>, 刘晓锋<sup>1</sup>, 于永刚<sup>2</sup>, 张 凡<sup>3</sup>, 徐 扬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>天津职业技术师范大学, 汽车与交通学院, 天津

<sup>2</sup>天津市公路事业发展服务中心, 天津

<sup>3</sup>天津易华录信息技术有限公司, 天津

Email: \*375814319@qq.com

收稿日期: 2021年7月14日; 录用日期: 2021年8月31日; 发布日期: 2021年9月7日

## 摘 要

车路协同技术已受到高度关注, 并逐步应用于国内外的智能交通系统当中, 如何有效评价车路协同系统的安全性、有效性和服务能力势在必行。现有研究主要侧重于车路协同系统的功能性评价, 较少考虑人-车-路-云的协同、系统决策控制效果、系统适应性等对评价结果的影响。基于此, 本研究首先选取了环境感知和定位精度、通信与传输能力、应用场景功能、决策控制效果和系统适应性5个一级评价指标, 构建了车路协同系统的评价指标体系。然后, 确定了层次分析和模糊综合评价相结合的方法, 搭建了基于多模通信的车路协同系统。最后, 开展了车路协同系统的综合测评实证研究, 研究结果表明本研究方法能够有效、全面地评价车路协同系统。

## 关键词

车路协同, 层次分析法, 模糊综合评价, 测试分析

# A Comprehensive Evaluation Approach for Vehicle-Infrastructure Cooperation System Using AHP Method

Wanyu Niu<sup>1\*</sup>, Xiaofeng Liu<sup>1</sup>, Yonggang Yu<sup>2</sup>, Fan Zhang<sup>3</sup>, Yang Xu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Automotive and Transportation, Tianjin University and Technology and Education, Tianjin

<sup>2</sup>Tianjin Highway Development Service Center, Tianjin

<sup>3</sup>Tianjin E-Hualu Information Technology Limited Company, Tianjin

Email: \*375814319@qq.com

\*通讯作者。

## Abstract

The vehicle-infrastructure cooperation system has been widely used and obtained the world-wide attention. Hence, it is imperative to effectively evaluate the safety, effectiveness, and service capability of this system. Existing research mainly focuses on its functional evaluation, and seldom considers the influence of human-vehicle-road-cloud cooperation, decision-making control, and system adaptability on the evaluation result. In this condition, this study selected five first-level evaluation indicators, *i.e.*, environmental perception and positioning accuracy, communication and transmission capability, application scenario, decision-making control effect, and system adaptability. Then, an evaluation index system of vehicle-infrastructure cooperation system was proposed. Next, the method combining AHP and fuzzy comprehensive evaluation was adopted, and a multi-mode communication based vehicle-infrastructure cooperation system was built. Finally, a filed testing using the vehicle-infrastructure cooperation system was implemented, and the study results show that the proposed method can evaluate the vehicle-infrastructure cooperation system effectively and comprehensively.

## Keywords

Vehicle-Infrastructure Cooperation System, AHP, Fuzzy Comprehensive Evaluation, Test Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

车路协同技术通过车车、车路之间的信息交互,进行车辆运行的主动安全控制、道路交通协同管理,实现人车路的协同,以提高交通通行效率和交通安全水平[1]。近十几年以来,世界各国高度重视车路协同技术的研发与应用。2003年,欧盟委员会提出了 eSafety 计划,充分利用先进的信息与通信技术,加快安全系统的研发与集成应用,改善道路交通安全。2006年,日本开展了 Smartway 项目,整合零散的智能交通系统功能,建立车路一体化集成平台,缓解交通拥堵,提高交通安全水平。2010年,美国提出了 IntelliDrive 计划,研究车路协同下的通信和实用化测试,开发和测试车载安全辅助系统。2020年,美国发布了《智能交通系统战略规划 2020~2025》,强调了自动驾驶(车路协同、车联网)的持续推广。我国高度重视车路协同技术的发展,开展了车路协同系统的封闭场地、半开放道路、高速公路的测试,部分研究成果已应用于工业园区、港口、无人矿区等场景。2020年颁布的《智能汽车创新发展战略》更是强调,将车路协同技术融入到智能汽车测试运行及示范应用上。因此,开展车路协同系统的综合测评,对推动车路协同技术的发展和应用,具有十分重要的现实意义。

在车路协同技术研究上,关注的内容包括车路协同系统的搭建、车速引导、节能减排、测试评价等。易振国[2]研究了车路协同实验测试系统的功能、构成及实现方法,系统分析了车路协同安全控制技术。杨良义等[3]搭建了真实的道路测试场景,开展了交叉口、路段的人、车、路协同测试,验证了测试方案的可行性和合理性。张存保等[4]研究了车路协同下道路交叉口信号控制优化方法,引导车辆运行,提高交通运行效率。Arnaout 等[5]和 Matsumoto 等[6],研究了车路协同技术在交通运行控制中的应用,研究

表明采用车路协同技术,可缓解交通拥堵,降低交通排放。王庞伟等[7]提出了一种基于车路信息融合的实时交通状态评价方法,研究表明该方法提高了评价结果的实时性及客观性。此外,在车路协同系统测试评价方面,柴少丹[8]从车车交互式系统安全、车路交互式系统安全、交通信号协调系统安全三个方面考虑,重点从系统安全的角度,选取了误警率、虚警率等指标,搭建了车路协同系统的模糊评价模型。张家铭[9]从效率、安全、环保、资源、舒适五个方面考虑,搭建了车路协同仿真系统的灰色多层次评判模型,应用于车路协同的仿真评价。张立爽[10]使用 Q-paramics 和 VS2013 软件,构建了车路协同系统仿真环境,从交叉口、路段和路网 3 个方面,选取了交通效率评估指标,最后构建了层次分析和 BP 神经网络的评估模型,开展了多场景的验证研究。赵晓华等[11]选取冬奥会兴延高速作为测试道路,考虑驾驶人的适应性,建立了一套车路协同系统的硬件在环效能测试平台,从主观和客观 2 个方面,评价了驾驶人的适应性。

在车路协同系统测试研究方面,现有研究多搭建仿真实验系统,且侧重于车路协同系统的功能性评价,较少考虑人-车-路-云的协同、系统决策控制效果、系统适应性等对评价结果的影响。因此,本研究从环境感知和定位精度、通信与传输能力、应用场景功能、决策控制效果和系统适应性 5 个方面,构建车路协同系统的评价指标体系。目前,常用的综合评价方法主要有层次分析法、模糊综合评价法、数据包络分析法、神经网络评价方法等[12]。本研究将采用层次分析和模糊综合评价相结合的方法,搭建基于多模通信的车路协同系统,并开展车路协同系统的综合测评及实证研究。

## 2. 车路协同系统综合评价指标体系的构建

### 2.1. 评价指标选取原则

对车路协同系统进行综合测评,需要考虑系统功能、适应性、控制效果、应用场景等因素。开展综合测评,需要按照一定的原则进行评价指标的选取。

#### 1) 科学性原则

考虑指标要从整个系统的角度考虑,不能局限于某子系统的特殊功能。科学的设计和选取指标,能够客观地反映车路协同系统的基本特征。

#### 2) 系统性原则

各指标之间要有一定的逻辑关系,从车路协同系统整体考虑,选取了系统功能、特性和效果等方面的指标,能够比较全面的反映车路协同系统的基本特征。

#### 3) 典型性原则

指标需要具有一定的代表性,减少重复性,尽可能准确的反映车路协同系统基本特征。如车道线定位精度就是一个代表性指标,如果再考虑系统的定位精度就会有一定的重复性。

#### 4) 可比性原则

可以获取相关指标数据,各指标应具有可比性。如从通信距离、通信时延、通信传输速率等方面,衡量不同车路协同系统的通信与传输能力。

#### 5) 易量化原则

数据的采集和处理应采取定性定量相结合的方式。如交通信息提示效果这一指标就带有一定的模糊性,需要通过定性定量分析,来提高评价体系的合理性和科学性。

### 2.2. 评价指标体系

本研究建立的车路协同系统评价指标体系结构,如表 1 所示。从环境感知与定位精度、通信与传输能力、应用场景功能、决策与控制效果、系统适应性 5 个方面,确定 21 个具体的评价指标。

**Table 1.** Evaluation indicator system of VICs**表 1.** 车路协同系统评价指标体系

环境感知与定位精度(B <sub>1</sub> )	行人/非机动车识别精度(C <sub>1</sub> )
	目标车辆识别精度(C <sub>2</sub> )
	车辆行驶状态识别精度(C <sub>3</sub> )
	交通信号、交通标牌识别精度(C <sub>4</sub> )
	车道线识别精度(C <sub>5</sub> )
通信与传输能力(B <sub>2</sub> )	通信距离(C <sub>6</sub> )
	通信时延(C <sub>7</sub> )
	通信传输速率(C <sub>8</sub> )
	接入/覆盖的车辆规模(C <sub>9</sub> )
车路协同系统综合评价(A)	应用场景功能(B <sub>3</sub> )
	安全类(C <sub>10</sub> )
	效率类(C <sub>11</sub> )
决策控制效果(B <sub>4</sub> )	信息服务类(C <sub>12</sub> )
	车辆运行状况预警准确率(C <sub>13</sub> )
	交通信息提示效果(C <sub>14</sub> )
	碰撞预警准确率(C <sub>15</sub> )
系统适应性(B <sub>5</sub> )	交通延误改善情况(C <sub>16</sub> )
	通信设备的兼容性(C <sub>17</sub> )
	“人-车-路-云”系统协同性(C <sub>18</sub> )
	抗干扰能力(天气、电磁、通信、隧道/高架)(C <sub>19</sub> )
	系统的容错与恢复处理能力(C <sub>20</sub> )
	信息安全水平(C <sub>21</sub> )

### 2.2.1. 环境感知与定位精度

环境感知与定位是开展车路协同控制的重要前提条件。在不同的交通场景中，可能发生人-车、车-车冲突，因此需要准确获取道路环境信息、行人/非机动车以及目标车辆的位置和实时运行状态，以避免冲突并开展车路协同控制。因此选取行人/非机动车识别精度、目标车辆识别精度、车辆行驶状态识别精度、交通信号、交通标牌识别精度、车道线识别精度 5 个二级指标。

### 2.2.2. 通信与传输能力

在车用场景下，车车间相对移动速度高，遮挡和信道环境复杂，高速率、低延时的通信与传输，对提高车辆运行安全、减少交通事故具有重要的意义。目前，车路协同系统常用的通信技术包括 DSRC (Dedicated Short Range Communication)、LTE (Long Term Evolution)-V、5G 等。DSRC 专用短程通信技术可靠性高；LTE-V(4G)部署相对容易，频谱带宽分配灵活，传输可靠；5G 传输速率高，通信时延低。不同通信技术[13] [14] [15]的比较如表 2 所示。

车路协同系统的路侧单元(Road Side Unit, RSU)需要具备实时接收车载单元(On Board Unit, OBU)、云平台信息的能力，并实现信息在 RSU、OBU 和云平台之间的交互。当接入的车辆(OBU)规模较大时，会对通信传输速率、时延等产生较大影响。因而选取通信距离、通信时延、通信传输速率、接入/覆盖的车辆规模 4 个二级指标。

**Table 2.** Comparison of different communication technologies  
**表 2.** 不同通信技术的比较

无线通信技术	DSRC	LTE-V (4G)	5G
通信距离	<1 km	1~3 km	<500 m
通信时延	<100 ms	50~100 ms	5~10 ms
通信速率	27 Mbps	100 Mbps	>1000 Mbps

### 2.2.3. 应用场景功能

车路协同技术要落地、应用，必须加大应用场景的示范。目前，我国已经在一些封闭、半封闭的场地(如产业园区、矿区、港口码头等)以及高速公路，开展了车路协同系统的部署、测试和应用。参考中国汽车工程学会《合作式智能运输系统-车用通信系统应用层及应用数据交互标准》(T/CSAE 53-2017)，本研究将应用场景分为安全类、效益类和服务类 3 种类型。

### 2.2.4. 决策与控制效果

车路协同系统应该具备感知、规划、决策的功能，其决策和控制效果如何，对推动车路系统的应用具有重要的现实意义。准确的感知到了周围交通环境，相应的系统没有及时做出准确决策和控制也影响交通安全和通行效率。因此选取了车辆运行状况预警准确率、交通信息提示效果、碰撞预警准确率、交通延误改善情况 4 个二级指标。

### 2.2.5. 系统适应性

车路协同系统接入的传感器众多，包括 OBU、RSU、通信设备、定位设备、移动终端等。另外，车路协同系统的云平台，需要进行多源、异构信息的实时传输、处理、发布等工作，涉及环节较多，有可能出现系统兼容性不佳和信息安全的问题。此外，一些外在环境也会对系统产生干扰。因此选取了设备和系统的兼容性、“人-车-路-云”系统协同性、抗干扰能力、系统的容错与恢复处理能力和信息安全水平 5 个二级指标。

## 3. 基于 AHP 的综合评价方法

目前，综合评价方法多种多样，每个方法都有不同的侧重点。考虑到车路协同系统的复杂性，评价指标较多且部分带有模糊性，因此，本研究决定采用混合式的综合评价方法，即基于层次分析的模糊综合评价法。首先，层次分析法能够将定性分析和定量分析有效结合，能保证评价模型的系统性和合理性。其次，模糊综合评价能够对部分定性的评价指标，给予不同的隶属度评价，将定性研究转化为定量研究。最后，层次分析法与模糊综合评价的结合，能够充分利用行业专家的经验 and 判断能力，为最终评价决策提供强有力的技术支持。

### 3.1. 层次分析法

层次分析法(The Analytic Hierarchy Process, AHP)是一种定性分析与定量分析相结合的多方案或者多目标的决策方法。目前该方法已广泛地应用在了多个领域，同时在交通领域也有了广泛的应用与研究[16][17]。

#### 1) 构造层次分析结构

首先，要把问题条理化、层次化，构造出一个层次分析结构模型。本文构建的综合评价体系见表 1，并在每个二级指标下设置五个评价等级：优秀、良好、一般、较差、差。

#### 2) 建立两两比较的判断矩阵

判断矩阵表示针对上一层某单元之间相对重要性的比较,一般采用 1~9 标度方法[12],对不同情况评比给出数量标度,可以得到判断矩阵  $A$ 。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

其中:  $a_{ij}$  表示指标  $i$  和指标  $j$  相对于目标重要值,且具有以下性质:

$$a_{ij} > 0; a_{ij} = 1/a_{ji} (i \neq j); a_{ii} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n).$$

### 3) 层次单排序及其一致性检验

层次单排序是指,对于上一层某因素而言,本层次各因素重要性的排序。目前最常用的就是和积法,求得各指标权重后,利用随机一致性比率进行满意的一致性检验[12]。

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

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{A\omega_i}{n\omega_i} \quad (3)$$

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

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

其中:  $\omega_i$  是评价指标  $i$  的权重向量;  $\lambda_{\max}$  是最大特征值;  $n$  是矩阵阶数;  $CI$  是一致性指标;  $RI$  是随机一致性指标,可通过查表得到;  $CR$  是随机一致性比率,当  $CR < 0.1$  时,可认为其具有满意的一致性。

### 4) 层次综合排序

利用层次单排序的计算结果,进一步综合出对上一层次的优劣顺序,就是层次总排序的任务。当有多个方案的时候,可以进行方案的比选。本研究不涉及多方案比较、选取,只需要计算出搭建的车路协同系统的综合评价值。

## 3.2. 模糊综合评价

模糊综合评价是以模糊数学为基础,应用模糊关系合成的原理,将一些边界不清、不易量化的因素定量化的一种综合评价方法。模糊综合评价法很好地解决了判断的模糊性和不确定性问题。目前该方法已广泛地应用在了多个领域,同时在交通领域也有了广泛的应用与研究[18][19]。

### 1) 确定因素集 $U$ 、评语集 $V$

$$U = \{u_i\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$V = \{v_j\}, j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中:  $u_i$  是第  $i$  个评价指标,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $v_j$  是第  $j$  个评价结果,  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  一般取值为 3~5。

对车路协同系统进行评分,总分 100 分。对车路协同系统的评价分为 5 个等级,即优秀[100, 90]、良好(90, 80]、一般(80, 70]、较差(70, 60]、差(60, 0]。另外,表 1 中 21 个评价指标的分级取值情况如表 3 所示。

**Table 3.** Classification of evaluation indicators  
**表 3.** 评价指标的分级取值情况

评价指标	优秀	良好	一般	较差	差	单位
行人/非机动车识别精度	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	%
目标车辆识别精度	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	%
车辆行驶状态识别精度	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	%
交通信号、交通标牌识别精度	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	%
车道线识别精度	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	%
通信距离	>1000	[1000, 500)	[500, 300)	[300, 100)	≤100	m
通信时延	≤20	[40, 20)	[70, 40)	[100, 70)	>100	ms
通信传输速率 (上行/下行)	≥100 ≥300	(100, 50] (300, 150]	(50, 30] (150, 50]	(30, 20] (50, 30]	(20, 0] (30, 0]	Mbps
接入/覆盖的车辆规模	>30	[30, 20)	[20, 10)	[10, 5)	[5, 0]	辆
安全类应用场景	>10	[10, 8)	[8, 5)	[5, 2)	[2, 0]	个
效率类应用场景	>5	[5, 4)	[4, 2)	[2, 1)	[1, 0]	个
信息服务类应用场景	>5	[5, 4)	[4, 2)	[2, 1)	[1, 0]	个
车辆运行状况预警准确率	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	%
交通延误改善情况	>10	[10, 5)	[5, 2)	[2, 0]	<0	%
碰撞预警准确率	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	%
交通信息提示效果	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	分
通信设备的兼容性	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	分
“人-车-路-云”系统协同性	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	分
抗干扰能力(天气、电磁、通信、隧道/高架)	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	分
系统的容错与恢复处理能力	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	分
信息安全水平	[100, 90]	(90, 80)	(80, 70)	(70, 60)	(60, 0]	分

2) 邀请相关领域专家, 对照表 3, 对每个一级指标下的二级指标进行打分, 确定评价指标的模糊关系矩阵  $R^k$

$$R^k = \begin{bmatrix} r_{11}^k & r_{12}^k & \cdots & r_{1n}^k \\ r_{21}^k & r_{22}^k & \cdots & r_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1}^k & r_{m2}^k & \cdots & r_{mn}^k \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:  $r_{ij}^k$  表示第  $k$  个一级指标下第  $i$  个因素在第  $j$  个评价结果的隶属度,  $i=1,2,\dots,m$ ,  $j=1,2,\dots,n$ ,  $r_{ij}^k > 0$ ,

且  $\sum_{j=1}^n r_{ij}^k = 1$ 。

3) 形成目标评价矩阵  $B$

$$B_i = \omega_i^T \cdot R^k \quad (9)$$

$$B = \{B_i\} \quad (10)$$

其中:  $R^i$  是子目标的模糊关系矩阵,  $B$  是各评价对象的模糊综合评矩阵。

4) 求总目标评价向量  $C$

$$C = \omega_0 \cdot B \quad (11)$$

其中:  $\omega_0$  是一级指标的权向量。

5) 按照最大隶属度原则, 得到评价对象的评价等级

确定  $\max_{1 \leq j \leq n} \{c_j\}$ , 则被评价对象属于第  $j$  个评价等级。

## 4. 车路协同系统的搭建与测试评价

### 4.1. 车路协同系统的搭建

2019年10月, 采用国内某公司的智能车载单元、路侧单元、组合天线、移动式红绿灯等设备, 在天津职业技术师范大学校内搭建了车路协同系统。其中, 车载单元具备车辆CAN总线信息读取分析功能, 同时通过CAN总线推送网联预警信息; 路侧单元内置WIFI、DSRC、4G通信模块, 通信距离大于500米, 支持最大下行速率150Mbps和最大上行速率50Mbps; 组合天线包括DSRC/LTE-V双模通信天线, GPS/BDS定位天线和4G蜂窝天线; 移动式红绿灯支持WIFI、DSRC、4G等多种通信方式, 可视距离大于300米。路侧单元加装在红绿灯灯杆上, 并通过4G通信, 与系统云平台相连接, 用于实现测试路口信息的适配, 以及OBU、RSU、红绿灯之间的信息互联互通。搭建的车路协同系统的定位精度小于2米, 平均时延小于40毫秒, 数据更新频率为10Hz。搭建的车路协同系统如图1所示。



Figure 1. The VICs experimental system

图 1. 车路协同系统

### 4.2. 车路协同系统的测试

利用搭建的车路协同系统的DSRC、4G无线通信技术, 开展车路协同信息(道路、车辆、交通信号等)的通讯与交互, 开展路段、交叉口的车辆安全避碰、车速引导、弯道预警、闯红灯预警、道路施工预警等场景的测试与评价。测试情景如图2所示。



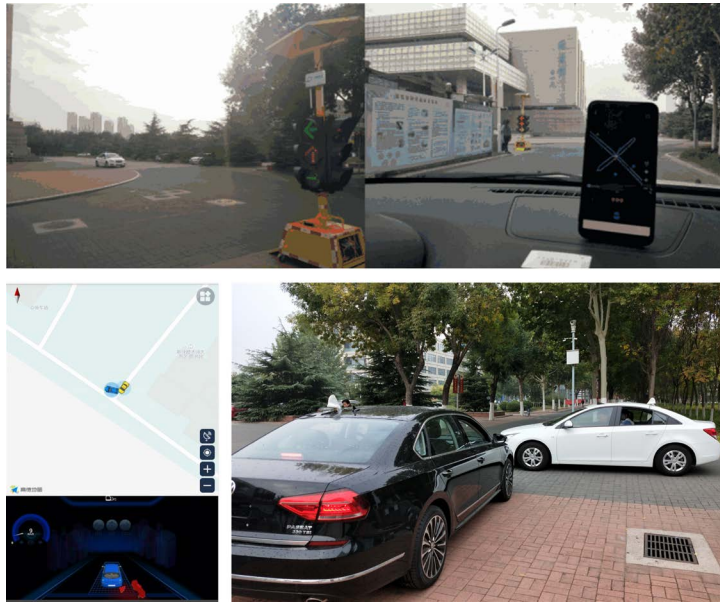


Figure 2. Testing situation of VICs  
图 2. 车路协同系统测试情况

### 4.3. 评价分析

由于受投资成本、场地条件、通信测试条件、车队规模等因素的影响，本研究只完成了表 1 中的部分评价指标的测试工作。因此，本研究主要针对车辆行驶状态识别、通信距离、通信时延、通信传输速率、安全类/效率类/信息服务类应用场景、车辆运行状况预警、交通信息提示、碰撞预警、“人-车-路-云”系统协同性等 11 个指标进行了测评，其它指标根据相关专家的经验和分析能力进行评价。

#### 4.3.1. 指标权重计算

对一级指标层应用层次分析法的 1~9 标度法，得到判断矩阵  $A_0$ ，再利用和积法，经计算得到一级指标  $U_0 = \{\text{环境感知与定位精度, 通信与传输能力, 应用场景功能, 决策与控制效果, 系统适应性}\}$  的权向量：

$$\omega_0 = (0.207 \quad 0.320 \quad 0.257 \quad 0.089 \quad 0.127)^T$$

进行一致性检验，由公式(3)，得  $\lambda_0 = 5.081$ ；判断矩阵一致性指标，由公式(4)，得  $CI = 0.020$ ；由公式(5)得  $CR = 0.018 < 0.1$ ，所以判断矩阵  $A_0$  具有可以接受的一致性。

同理，可得每个一级指标下的二级指标的权重如下。

环境感知与定位精度下的二级指标权向量为：

$$\omega_1 = (0.079 \quad 0.263 \quad 0.202 \quad 0.175 \quad 0.281)^T$$

通信与传输能力下的二级指标权向量为：

$$\omega_2 = (0.243 \quad 0.340 \quad 0.243 \quad 0.174)^T$$

应用场景功能下的二级指标权向量为：

$$\omega_3 = (0.539 \quad 0.297 \quad 0.164)^T$$

决策与控制效果下的二级指标权向量为：

$$\omega_4 = (0.235 \quad 0.138 \quad 0.489 \quad 0.138)^T$$

系统适应性下的二级指标权向量为:

$$\omega_5 = (0.122 \quad 0.176 \quad 0.246 \quad 0.288 \quad 0.168)^T$$

经过计算每个判断矩阵都具有可以接受的一致性, 符合要求。

### 4.3.2. 建立评价矩阵

根据表 3 的内容, 设计打分表格, 由 20 位专家对相关指标进行评判, 可得环境感知与定位精度下的二级指标模糊关系矩阵  $R^1$ :

$$R^1 = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.80 & 0.15 & 0.05 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.25 & 0.10 & 0.05 & 0.00 \\ 0.60 & 0.30 & 0.05 & 0.05 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$$

根据公式(9), 可得环境感知与定位精度的评价矩阵为:

$$B_1 = (0.437 \quad 0.142 \quad 0.042 \quad 0.019 \quad 0.360)$$

同理计算其他评价矩阵, 结果如下。

通信与传输能力的评价矩阵为:  $B_2 = (0.085 \quad 0.248 \quad 0.362 \quad 0.078 \quad 0.227)$

应用场景功能的评价矩阵为:  $B_3 = (0.000 \quad 0.000 \quad 0.539 \quad 0.000 \quad 0.461)$

决策与控制效果的评价矩阵为:  $B_4 = (0.430 \quad 0.368 \quad 0.188 \quad 0.007 \quad 0.007)$

系统适应性的评价矩阵为:  $B_5 = (0.018 \quad 0.026 \quad 0.920 \quad 0.026 \quad 0.010)$

故综合评价矩阵为:  $B = (B_1 \quad B_2 \quad B_3 \quad B_4 \quad B_5)^T$ , 根据本文提出的评价体系可以看出该系统在环境感知与定位精度、决策与控制效果方面表现优秀, 在通信与传输能力、系统适应性方面表现一般, 应用场景功能方面表现较差。

再根据 4.3.1 节中  $\omega_0$  的取值, 则有  $C = (0.158 \quad 0.145 \quad 0.397 \quad 0.033 \quad 0.267)$ 。根据最大隶属度原则, 可知评语集中隶属度的最大值为 0.397, 因此该车路协同系统的评级结果为一般。受投资成本等因素的制约, 本研究搭建的车路协同系统功能等方面并不完善, 缺乏行人/非机动车识别、车道线识别、接入/覆盖的车辆规模等功能, 因此评价结果一般。

## 5. 结论

针对车路协同系统测评, 构建了基于 AHP 的模糊综合评价方法, 搭建了车路协同系统, 开展相关测试研究, 并进行了测评方法的实证研究。结果表明本研究提出的方法能够比较客观和全面的评价车路协同系统。不过随着科技的进步, 车路协同系统的功能和技术水平也会不断完善, 对车路协同系统的评价要求也会不断提高。同一车路协同系统, 在不同的评价标准下, 其评价结果可能会有较大的差异, 这就需要动态的考虑车路协同系统的测评问题, 并开展深入的研究。

## 基金项目

天津市重点研发计划项目(19YFSLQY00010), 天津市自然科学基金(19JCQNJC03400), 天津市智能交通技术创新团队重点培养专项(XC202028)。

## 参考文献

- [1] 王云鹏, 鲁光泉, 于海洋. 车路协同环境下的交通工程[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 106-110.
- [2] 易振国. 车路协同实验测试系统及安全技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [3] 杨良义, 陈涛, 谢飞. 车路协同系统功能实现的场景测试技术研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(5): 43-47.
- [4] 张存保, 冉斌, 梅朝辉. 车路协同下道路交叉口信号控制优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(3): 40-45.
- [5] Arnaout, G. and Bowling, S. (2011) Towards Reducing Traffic Congestion Using Cooperative Adaptive Cruise Control on a Freeway with a Ramp. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 4, 699-717.  
<https://doi.org/10.3926/jiem.344>
- [6] Matsumoto, S., Park, T. and Kawashima, H. (2014) A Comparative Study on Fuel Consumption Reduction Effects of Eco-Driving Instructions Strategies. *International Journal of Intelligent Transportation System Research*, 12, 1-8.  
<https://doi.org/10.1007/s13177-013-0066-8>
- [7] 王庞伟, 于洪斌, 张为, 王力, 吴文祥. 城市车路协同系统下实时交通状态评价方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 176-187.
- [8] 柴少丹. 车路协同系统功能测试和评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [9] 张家铭. 车路协同仿真系统测试及其验证方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [10] 张立爽. 车路协同系统交通仿真环境构建及效率评估方法[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [11] 赵晓华, 陈雨菲, 李海舰, 邢冠仰, 冯笑凡. 面向人因的车路协同系统综合测试及影响评估[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 248-261.
- [12] 杜栋, 庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [13] 陈慧等. 5G 产业和应用发展白皮书[R]. 南京: 中通服咨询设计研究院有限公司, 2020.
- [14] 缪立新, 王发平. V2X 车联网关键技术研究及应用综述[J]. 汽车工程学报, 2020, 10(1): 1-12.
- [15] 车路一体化智能网联体系 C-V2X 白皮书[R]. 深圳: 华为技术有限公司, 2020.
- [16] 杨春风, 王玉洁. 基于灰色层次分析法的高速公路理论交通安全度评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 39(6): 34-39.
- [17] 潘丽莎, 陈龙, 刘兰, 陈波, 秦勇. 基于层次分析法和熵值法的城市轨道交通车站安全评价[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(9): 48-51.
- [18] 王瑜, 李勇. 基于模糊综合评价的 HOV 车道综合效益分析[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 148-158.
- [19] 晏雨婵, 白璘, 武奇生, 叶珍. 基于多指标模糊综合评价的交通拥堵预测与评估[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(12): 3697-3704.