

团 体 标 准

T/ITS 0299-2025

自主式交通系统 交通主体互操作核心能力评价指标体系

Autonomous transportation systems——

Evaluation index system for interoperability core capability of transportation entities

2025-11-26 发布

2025-11-26 实施

中国智能交通产业联盟 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义及缩略语	2
4 自主式交通主体互操作能力评价指标体系	3
5 互操作传输层评价指标及计算方法	5
6 互操作数据层评价指标及计算方法	9
7 互操作行为层评价指标及计算方法	12
8 互操作应用层评价指标及计算方法	16
附录 A（资料性）语义规则合理性案例	22

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国智能交通产业联盟（C-ITS）提出并归口。

本文件起草单位：株洲中车时代电气股份有限公司、北方工业大学、北京航空航天大学、交通运输部水运科学研究所、交通运输部公路科学研究院、北京交通大学、北京邮电大学。

本文件主要起草人：王戡弋、郭伟伟、王泉东、谭壑元、袁希文、郑国荣、薛晴婉、张沙、康高强、彭里奇、林军、龙腾、于海洋、任毅龙、李振华、董宏辉、李静林、袁泉、刘砚玥、付翔、兰征兴、刘伟康、蒋小晴、陈楠、徐亮、李东升、周昱城、熊自翔、何伟、罗鑫。

自主式交通系统 交通主体互操作核心能力评价指标体系

1 范围

本文件规定了自主式交通系统交通主体互操作核心能力的评价指标体系，具体包括交通主体互操作能力评价指标体系框架、评价指标定义、评价指标计算方法。

本文件适用于自主式公路交通系统、自主式轨道交通系统、自主式水运交通系统等自主式交通系统的交通主体间互操作核心能力评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 12758-2023 城市轨道交通信号系统通用技术条件
- GB/T 25069-2022 信息安全技术 术语
- GB/T 32916-2023 信息安全技术 信息安全控制评估指南
- GB/T 33171-2016 城市交通运行状况评价规范
- GB/T 34590-2022 道路车辆功能安全
- GB/T 39277-2020 船舶交通管理系统
- GB/T 40861-2021 汽车信息安全通用技术要求
- GB/T 44417-2024 车路协同系统智能路侧协同控制设备技术要求和测试方法
- GB 44495-2024 汽车整车信息安全技术要求
- YD/T 3751-2020 基于LTE的车联网无线通信技术 安全技术要求
- T/CSAE 53-2017 合作式智能运输系统 车用通信系统 应用层及应用层数据交互标准
- T/CSAE 248-2022 合作式智能运输系统 车路协同云控系统 C-V2X设备接入技术规范
- DB11/T 785-2011 城市道路交通运行评价指标体系
- ISO 19091-2019 使用V2I通信的信号相位与配时应用 (Intelligent transport systems — Cooperative)
- ISO 22737-2021 智能运输系统 - 低速自动驾驶系统在特定运行区域内的运行性能要求、系统要求和性能测试 (Intelligent transport systems — Low-speed automated driving (LSAD) systems for predefined routes — Performance requirements, system requirements and performance test procedures)

ITS — Using V2I communications for applications related to signalized intersections)

ISO/SAE 21434-2021 道路车辆 - 网络安全工程 (Road vehicles — Cybersecurity engineering)

ISO 26262-2018 道路车辆 - 功能安全 (Road vehicles — Functional safety)

3 术语和定义及缩略语

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 术语和定义

3.1.1

自主式交通系统 autonomous transportation systems

以自主感知、自主决策、自主执行为特征的高度智能、高度自治的交通系统。

3.1.2

交通主体 traffic subject

自主式交通系统中，通过信息接收、分析决策和控制功能实现明确功能目标的基础单元。

3.1.3

互操作 interoperation

两个或两个以上的系统或组件之间交换数据并使用相互间理解的已交互数据的能力。

3.1.4

交通主体互操作能力 interoperability of traffic subject

指两个或者多个自主式交通主体在开放交通环境中，实现安全、高效、协同运行的能力，主要体现在高可靠通信、语义认知、群智决策等三个方面。

3.1.5

自主式公路交通系统 autonomous highway transportation system

在一定程度上具备自主感知、自主决策和自主执行能力的公路交通系统，也称为自主化道路系统。

3.1.6

自主式轨道交通系统 autonomous rail transportation system

通过车-轨-云协同控制实现环境感知、自主决策和精准执行的轨道交通系统，在少人或无人干预的情况下完成列车运行调度、安全防护、乘客服务等全流程功能，也称为自动驾驶轨道交通系统。

3.1.7

自主式水路交通系统 autonomous waterway transportation system

利用新兴技术，通过自动化感知、自动化决策和自动化执行，实现船舶、航道、港口等要素智能协同运行的水路交通系统。

3.1.8

虚假主体 false entity

虚假主体是指在自主式交通系统中，通过伪造身份、篡改数据或模拟合法行为，故意误导系统决策、破坏协同机制或危害交通安全的非法或恶意参与者。

3.2 缩略语

BER: 误码率 (Bit Error Rate)

QoS: 服务质量 (Quality of Service)

4 自主式交通主体互操作核心能力评价指标体系

4.1 自主式交通主体互操作核心能力评价指标体系框架

自主式交通系统系统主体间的互操作包括4个层级，自低至高分别是互操作的传输层、数据层、行为层、应用层，高层级功能依靠底层级功能实现。传输层应具备高可靠通信能力，数据层应具备语义协同认知能力，行为层应具备群智决策控制能力，应用层应为整个交通系统带来的宏观效益和价值，具体评价指标体系框架见图1。

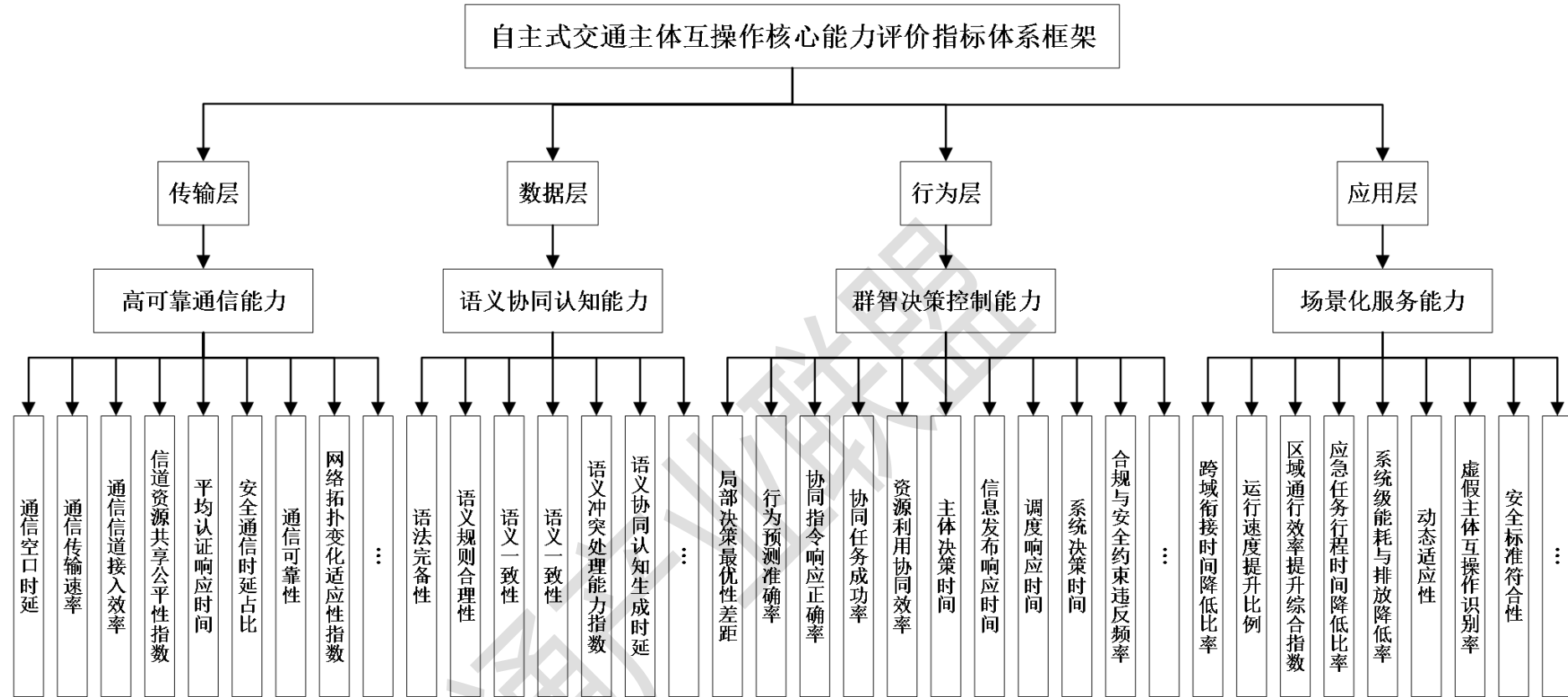


图 1 自主式交通主体互操作核心能力评价指标体系框架

4.2 自主式交通主体互操作层次概念

4.2.1 互操作传输层

互操作传输层是为互操作对象之间的数据交换所建立的通用基础通信信道,包括所使用的物理介质,以及基于物理信道的传输机制,可参照IEEE 802.3、IEEE 802.11、TCP/IP、HTTP/HTTPS、AMQP协议和MQTT协议等标准执行。

4.2.2 互操作数据层

互操作数据层通过统一的数据模型、语义规范与数据治理机制,实现跨系统数据的结构化表达、一致性解释与可信共享,为上层互操作提供数据支撑。

4.2.3 互操作行为层

互操作行为层为互操作对象使用互操作信息(一般包含控制类指令)的实体行为结果提供保障。行为互操作一般也称为远程控制或遥控。

4.2.4 互操作应用层

互操作应用层面向具体业务场景实现端到端的协同服务,通过集成下层互操作能力,构建跨域业务流程和一体化应用方案,直接支撑用户级功能实现与业务目标达成。

4.3 自主式交通主体互操作能力要求

4.3.1 高可靠通信能力

自主式交通主体通信机制应满足交通主体间实时交互需求,具备协同过程与算网资源联合优化的性能增强机制,并能保障对象随机性和即时性的安全可信交互。

4.3.2 语义协同认知能力

自主式交通主体应具备公共状态知识表达模型、互操作语言及语言解析能力,并能实现跨域多交通主体的态势协同认知。

4.3.3 群智决策控制能力

自主式交通主体应能协同跨域多交通主体实现互操作功能,实现载运装备互操作、交通管控互操作、基础设施互操作等的多主体异步互操作联盟控制。

5 互操作传输层评价指标及计算方法

5.1 通信空口时延

5.1.1 指标定义

在通信系统中数据从发送端的无线接口传输到接收端的无线接口所需的时间。这个时延包含了信号通过空中传播的时间以及在发射机和接收机中处理信号所花费的时间。

5.1.2 计算方法

在通信系统中通信空口时延通常包括传输时延、传播时延、处理时延以及排队时延，算法如公式(1)所示。

$$T_{\text{air}} = T_{\text{trans}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{proc}} + T_{\text{queue}} \quad (1)$$

式中：

T_{air} ：通信空口时延，ms。

T_{trans} ：传输时延，数据包从发送端发出所需的时间，ms。

T_{prop} ：传播时延，电磁波在空间中传播的时间，ms。

T_{proc} ：处理时延，编码/解码、调制/解调、加密/解密等信号处理时间，ms。

T_{queue} ：数据包在发送缓冲区等待调度的时延，ms。

5.2 通信传输速率

5.2.1 指标定义

在通信系统中每秒传送的比特（bit）数，单位为 bps（Bit Per Second）。

5.2.2 指标算法

通信传输速率算法如公式(2)所示。

$$V_{\text{trans}} = N_{\text{total}} / T_{\text{total}} \quad (2)$$

式中：

V_{trans} ：通信传输速率，bps；

N_{total} ：传输总码数，bit；

T_{total} ：传输时长，s。

5.3 通信信道接入效率

5.3.1 指标定义

通信信道接入效率是指在单位统计时间内，通信系统在高密度节点竞争环境下，成功完成从信道竞争、资源分配到数据包完整传输（含接收确认）全过程的业务量与信道接入请求总量的比值。

5.3.2 指标算法

通信信道接入效率算法如公式(3)所示。

$$E_c = N_{\text{successful}} / N_{\text{attempts}} \quad (3)$$

式中：

E_c ：信道接入效率；

$N_{\text{successful}}$ ：在单位时间内成功获得信道资源并完成数据包传输的次数；

N_{attempts} ：在单位时间内所有竞争节点尝试接入信道的总次数。

5.4 信道资源共享公平性指数

5.4.1 指标定义

信道资源共享公平性指数是用于量化评估在高密度节点竞争场景下，通信系统为不同优先级的协同业务按其既定服务质量等级分配信道资源的合理性与依从性。

5.4.2 指标算法

信道资源共享公平性指数算法如公式（4）-（5）所示。

$$I_F = \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right)^2 / \left(n \times \sum_{i=1}^n Q_i^2 \right) \quad (4)$$

$$Q_i = T_{\text{access},i} / \omega_{pw,i} \quad (5)$$

式中：

I_F ：公平性指数（0-1，1表示完全公平）；

Q_i ：第*i*类业务的加权服务质量得分；

n ：业务类型总数；

$T_{\text{access},i}$ ：第*i*类业务成功接入信道的总时间，ms；

$\omega_{pw,i}$ ：第*i*类业务优先级权重，紧急业务权重建议 0.4，安全业务权重建议 0.3，效率业务权重建议 0.2，普通业务权重建议 0.1。

5.5 平均认证响应时间

5.5.1 指标定义

所有测试样本的响应时间与样本个数的比值。其中，测试样本的响应时间是从发起认证请求到收到认证结果的时间。

5.5.2 指标算法

平均认证响应时间算法如公式（6）所示。

$$T_a = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{authen},i}}{n} \quad (6)$$

式中：

T_a ：平均认证响应时间, ms；

$T_{\text{authen},i}$ ：第*i*个样本的响应时间, ms；

n ：测试样本个数。

5.6 安全通信时延占比

5.6.1 指标定义

安全通信时延占比是指为保障通信安全,在端到端数据传输过程中启用完整的信息安全机制(包括密码学套件与身份认证协议)所引入的额外通信时延,与基准通信总时延的比率。

5.6.2 指标算法

安全通信时延占比算法如公式(7)所示。

$$P_{\text{overhead}} = (T_{\text{secure}} - T_{\text{insecure}}) / T_{\text{insecure}} \quad (7)$$

式中：

P_{overhead} ：安全通信时延占比；

T_{secure} ：启用安全套件时的端到端时延, ms；

T_{insecure} ：不启用安全套件时的端到端时延, ms。

5.7 通信可靠性

5.7.1 指标定义

在通信系统中数据从发送端到接收端能够准确无损地传输的概率或能力。数字通信系统的可靠性可以通过BER评估,误码率表示所接收到的数字信号中出现错误的程度。

5.7.2 指标算法

通信可靠性算法如公式(8)所示。

$$R_c = 1 - BER = 1 - N_{\text{error}} / N_{\text{total}} \quad (8)$$

式中：

R_c ：通信可靠性；

N_{error} ：传输中的误码数, bit；

N_{total} ：传输总码数, bit。

5.8 网络拓扑变化适应性指数

5.8.1 指标定义

网络拓扑变化适应性指数是用于量化评估通信网络在节点相对位置动态变化（如车辆交汇、船舶交会等场景）条件下，维持通信链路连通质量与路由路径优化效能的能力指标。

5.8.2 指标算法

网络拓扑变化适应性指数算法如公式（9）所示。

$$I_a = 1 - (T_{rec} / T_{obs}) \quad (9)$$

式中：

I_a : 拓扑变化适应性指数（0-1）；

T_{rec} : 网络拓扑变化后的路由收敛时间，s；

T_{obs} : 观测时间窗口，s。

6 互操作数据层评价指标及计算方法

6.1 语法完备性

6.1.1 指标定义

语法完备性是指语法系统是否能够描述或生成所有合法的句子或表达式，而不会遗漏任何合法的结构。可以采用合法性评估、唯一性评估、封闭性评估等指标评估语法完备性。

6.1.2 指标算法

语法完备性算法如公式（10）所示。

$$S_s = \omega_1 \cdot S_l + \omega_2 \cdot S_u + \omega_3 \cdot S_{cl} \quad (10)$$

式中：

S_s : 语法完备性得分；

ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为语法合法性、语法唯一性、语法封闭性的权重，且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ ，建议 $\omega_1 = 0.6$ ， $\omega_2 = 0.2$ ， $\omega_3 = 0.2$ ；

S_l : 语法合法性得分；

S_u : 语法唯一性得分；

S_{cl} : 语法封闭性得分；

语法合法性指某个具体实例（如代码、数据报文、表达式）是否符合语法系统所定义的规则，包括结构、格式、取值范围等约束。合法性的核心在于确保实例在数据层面严格遵循预定义规范。语法合法性评估算法如公式（11）——（13）所示。

$$G = (V, \Sigma, P, S) \quad (11)$$

式中：

G : 语法系统；

V : 非终结符集；

Σ : 终结符集；

P : 产生式规则集；

S : 起始符号。

$$C_{\text{test}} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (12)$$

式中：

C_{test} : 测试语料库；

s_i : 第*i*个测试样本，包含合法、非法样本标注；

n : 测试样本数量。

$$S_i = 1 - \frac{|\{s \in C_{\text{legal}} \mid G \vdash s\}|}{C_{\text{legal}}} \quad (13)$$

式中：

C_{legal} : 标注合法的样本。

语法唯一性确保在特定上下文中，语法系统中的某些元素（如标识符、名称、符号）具有全局唯一性，避免因重复定义导致歧义或冲突。语法唯一性评估算法如公式（14）所示。

$$S_u = 1 - \frac{|\{s \in C_{\text{legal}} \mid \text{count_parses}(G, s) > 1\}|}{C_{\text{legal}}} \quad (14)$$

式中：

$\text{count_parses}(G, s)$: 样本 s 在 G 下的语法分析树数量。

语法封闭性确保语法系统中所有引用或使用的元素均被明确定义，不存在未声明或悬空的引用。封闭性要求系统在逻辑上自洽，所有依赖项内部可解析。语法封闭性评估算法如公式（15）所示。

$$S_{c1} = 1 - \frac{N_{\text{nonclosed}}}{n} \quad (15)$$

式中：

$N_{\text{nonclosed}}$: 样本集合中任意两个合法样本，组合或推导运算后不封闭的数量；

n : 测试案例的数量，即使用 G 的产生式规则，从 S 开始推导出所有可能的样本集合。

6.2 语义规则合理性

6.2.1 指标定义

语义规则合理性是指在特定上下文中，语义规则是否能够正确、合理地解释和处理文本或数据。采用准确率描述语义规则合理性。准确率是指规则正确处理的样本数占总样本数的比例。

6.2.2 指标算法

定义语义规则集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ ，语义规则标注数据集 $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$ 其中 x_i 是输入文本/数据， y_i 是人工标注的标准结果，语义规则合理性得分算法如公式 (16) —— (17) 所示。

$$S_r = \frac{\sum_{i=1}^n S(r_i)}{n} \quad (16)$$

$$S(r_i) = \frac{\sum_{j=1}^m (I(r_i(x_j) = y_j))}{\sum_{j=1}^m (I(r_i \text{ 适用于 } x_j))} \quad (17)$$

式中：

S_r ：语义规则合理性得分；

$S(r_i)$ ：规则 r_i 的合理性得分，分母是规则 r_i 适用的总样本数，分子是规则输出与标注一致的正确样本数；

I：指示函数，匹配是为1，否则为0。

6.3 语义一致性

6.3.1 指标定义

交通主体间的数据或信息在意义和逻辑上保持一致，没有矛盾或冲突。信息在表达上是连贯的、合理的，并且符合逻辑。

6.3.2 指标算法

语义一致性评分算法如公式 (18) 所示。

$$S_{c2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \delta_i}{n} \quad (18)$$

式中：

S_{c2} ：语义一致性得分；

ω_i ：第 i 个冲突的权重 ($0 \leq \omega_i \leq 1$)；

δ_i ：二元函数，存在冲突为1，否则为0；

n ：总命题数。

6.4 语义冲突处理能力指数

6.4.1 指标定义

语义冲突处理能力指数是用于量化评估系统在接收到与现有知识库存在逻辑矛盾或语义歧义的外部信息时，自动识别、分析并标记此类语义冲突的综合能力。

6.4.2 指标算法

语义冲突处理能力指数算法如公式（19）所示。

$$P_c = N_{\text{detected}} / N_{\text{total}} \quad (19)$$

式中：

P_c ：语义冲突检测率；

N_{detected} ：系统成功检测并标记出的冲突数量；

N_{total} ：在测试中注入的语义冲突总数。

6.5 语义协同认知生成时延

6.5.1 指标定义

语义协同认知生成时延是指自主式交通主体从接收其他主体或系统数据时刻起，到通过语义解析、冲突消解与和态势推理等处理流程，在内部生成语义一致、且可用于协同决策的协同认知模型的累计时间消耗。

6.5.2 指标算法

语义协同认知生成时延算法如公式（20）所示。

$$T_S = T_{SR} - \max(T_{S1}, T_{S2}, \dots, T_{Sn}) \quad (20)$$

式中：

T_S ：语义协同认知生成时延，ms；

T_{SR} ：系统完成当前周期协同认知模型的时间戳；

T_{Si} ：在最大允许等待时间范围内，第 i 个信息源的语义就绪时间戳；

$\max()$ ：取所有必需的语义信息源中就绪时间最晚的时间戳。

7 互操作行为层评价指标及计算方法

7.1 局部决策最优性差距

7.1.1 指标定义

局部决策最优性差距是用于量化评估在群智协同框架下，单个交通主体基于局部信息作出的自主决策与系统全局最优决策之间性能差异的指标。

7.1.2 指标算法

局部决策最优性差距算法如公式（21）所示。

$$G_p = |P_{\text{local}} - P_{\text{global}}| / P_{\text{global}} \quad (21)$$

式中：

G_p ：局部决策最优性差距（% 或 绝对差值）；

P_{local} ：基于局部决策的实际绩效值（如行程时间、能耗）；

P_{global} ：全局最优解对应的理论最优绩效值。

7.2 行为预测准确率

7.2.1 指标定义

行为预测准确率是指交通主体在特定时间窗口内，对其他交通参与者的短期运动行为（包括轨迹、速度剖面等）进行预测的结果与实际观测行为之间的一致性程度。

7.2.2 指标算法

行为预测准确率算法如公式（22）所示。

$$P_a = \sum \left(\begin{array}{l} 1, \text{if } |p_{\text{pre}} - p_{\text{act}}| \leq \varepsilon_p \\ 0, \text{otherwise} \end{array} \right) / n \quad (22)$$

式中：

P_a ：预测时间范围内交通主体对其他交通主体短期行为预测的准确率。

p_{pre} ：预测时间范围内预测行为；

p_{act} ：预测时间范围内实际行为；

ε_p ：误差容限；

n ：预测时间范围内预测目标数量。

7.3 协同指令响应正确率

7.3.1 指标定义

协同指令响应正确率是指交通主体对接收到的标准化协同控制指令（如速度引导、车道分配建议等），作出符合协同控制协议规定响应行为的比例。

7.3.2 指标算法

协同指令响应正确率算法如公式（23）所示。

$$P_r = N_{\text{correct}} / N_{\text{total}} \quad (23)$$

式中：

P_r ：协同指令响应正确率（%）；

N_{total} ：接收到的协同指令总数；

N_{correct} ：正确响应指令的次数。

7.4 协同任务成功率

7.4.1 指标定义

协同任务成功率是指在预设的标准化测试场景中，多个自主式交通主体通过协同交互，在规定时间内阈值和状态约束条件下，共同完成指定复杂任务的比率。

7.4.2 指标算法

协同任务成功率算法如公式（24）所示。

$$P_s = N_s / N_{\text{total}} \quad (24)$$

式中：

P_s ：协同任务成功率；

N_s ：成功完成的任务数

N_{total} ：测试任务总数。

7.5 资源利用协同效率

7.5.1 指标定义

资源利用协同效率是通过实施协同控制策略，使特定时空域内交通资源（包括路口通行权、航道使用权、泊位分配等）的总体利用效能相较于基准场景的提升幅度。

7.5.2 指标算法

资源利用协同效率算法如公式（25）-（26）所示。

$$P_{\text{resource}} = (U_1 - U_0) / U_0 \quad (25)$$

$$U = (Q_{\text{veh}} \times T_{\text{test}}) / (C_{\text{capacity}} \times T_{\text{total}}) \quad (26)$$

式中：

P_{resource} ：资源利用协同效率提升；

U_1, U_0 ：协同前后的时空资源利用率；

Q_{veh} ：测试中的车辆数，veh；

T_{test} ：测试时间，h；

C_{capacity} ：通行能力，pcu/h；

T_{total} ：总观测时间，h。

7.6 主体决策时间

7.6.1 指标定义

主体决策时间是指自主式交通主体从其关键感知数据就绪时刻起，至完成环境认知理解并生成最终决策控制指令时刻止，所经历的时间间隔。

7.6.2 指标算法

主体决策时间算法如公式（27）所示。

$$T_c = \sum_{i=1}^n (T_{d,i} - T_{p,i}) / n \quad (27)$$

式中：

T_c ：平均决策周期，ms；

$T_{d,i}$ ：第*i*个周期决策输出时间戳；

$T_{p,i}$ ：第*i*个周期感知数据就绪时间戳；

n ：周期数量。

7.7 信息发布响应时间

7.7.1 指标定义

交通主体（路侧基础设施、交通管控以及载运装备智能终端）等发布个性化信息以及群体信息请求，从该请求时刻开始，到系统接收请求并发送交通信息为止，这个过程中所消耗的平均时间。

7.7.2 指标算法

信息发布响应时间算法如公式（28）所示。

$$T_i = \frac{\sum_{i=1}^n T_{IDRS,i}}{n} \quad (28)$$

式中：

T_i ：信息发布响应时间，s；

$T_{IDRS,i}$ ：为第*i*个请求消耗时间，s；

n ：交通信息发布请求数量。

7.8 调度响应时间

7.8.1 指标定义

单位时间内，交通主体发送车辆调度请求，从该请求时刻开始，到系统接收请求并发送调度指令为止，这个过程中所消耗的平均时间。

7.8.2 指标算法

调度响应时间算法如公式（29）所示。

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^n T_{SRTL,i}}{n} \quad (29)$$

式中：

T_s ：调度响应时间，s；

$T_{SRTL,i}$ ：为第*i*个请求消耗时间，s；

n ：道路车辆调度请求数量。

7.9 系统决策时间

7.9.1 指标定义

单位时间内，交通主体发送路径规划、信号控制等任务需求，从系统接收到这些需求的时刻开始计算，到系统完成计算任务，这个过程所消耗的平均时间。

7.9.2 指标算法

系统决策时间算法如公式（30）所示。

$$T_D = \frac{\sum_{i=1}^n T_{SDT,i}}{n} \quad (30)$$

式中：

T_D ：系统决策时间，s；

$T_{SDT,i}$ ：系统单位时间内第*i*个任务消耗时间，s；

n ：系统单位时间内所有任务数。

7.10 合规与安全约束违反频率

7.10.1 指标定义

合规与安全约束违反频率是指单位决策周期内，交通主体输出的控制策略违反既定交通法规、安全边界（如最小安全距离）或物理约束条件的频次。

7.10.2 指标算法

合规与安全约束违反频率算法如公式（31）所示。

$$P_{\text{violation_occurred}} = \sum \left[\begin{array}{l} 1, \text{ if } constraint \in C : G(\text{constraint}) < 0 \\ 0, \text{ otherwise} \end{array} \right] / n \quad (31)$$

式中：

$P_{\text{violation_occurred}}$ ：约束违反频率；

C ：约束集合 {安全约束，交通规则，物理限制，……}；

$G(\cdot)$ ：约束函数， $G < 0$ 表示违反约束；

n ：测试时间范围内输出方案总数量。

8 互操作应用层评价指标及计算方法

8.1 跨域衔接时间降低比率

8.1.1 指标定义

自主式交通系统部署前后，货物或旅客在不同交通模式间换乘/转运的平均时间减少比例。主要面向综合客运枢纽、多模式联运物流等场景。

8.1.2 指标算法

跨域衔接时间降低比率算法如公式（32）-（33）所示。

$$P_{\text{transfer}} = (T_{\text{transfer},0} - T_{\text{transfer},1}) / T_{\text{transfer},0} \quad (32)$$

$$T_{\text{transfer}} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{j=m} (T_{b,j,i} - T_{a,j,i}) / k \right) / n \quad (33)$$

式中：

- P_{transfer} ：货物或旅客在不同交通模式间换乘/转运的平均换乘、衔接时间减少比例；
- $T_{\text{transfer},0}$ ：系统部署前的货物或旅客在不同交通模式间换乘/转运的平均换乘时间，min；
- $T_{\text{transfer},1}$ ：系统优化后的货物或旅客在不同交通模式间换乘/转运的平均换乘时间，min；
- T_{transfer} ：货物或旅客在不同交通模式间换乘/转运的平均换乘时间，min。
- $T_{b,j,i}$ ：第*i*个样本第*j*次换乘，即从交通模式a换乘交通模式b，交通模式b出发的时间戳；
- $T_{a,j,i}$ ：第*i*个样本第*j*次换乘，即从交通模式a换乘交通模式b，交通模式a结束的时间戳；
- n ：统计的联运换乘/转运样本数量。
- m ：统计的联运换乘/转运样本换乘次数。

8.2 运行速度提升比例

8.2.1 指标定义

自主式交通系统部署前后所有车辆运行速度提升比例。

8.2.2 指标算法

运行速度提升比例算法如公式（34）-（37）所示。

$$P_v = (P_{R1} + P_{R2} + P_{R3}) / 3 \quad (34)$$

$$P_{R1} = \frac{v_{R1,1} - v_{R1,0}}{v_{R1,0}} \quad (35)$$

$$P_{R2} = \frac{v_{R2,1} - v_{R2,0}}{v_{R2,0}} \quad (36)$$

$$P_v = \frac{v_{V,1} - v_{V,0}}{v_{V,0}} \quad (37)$$

式中：

- P_v ：运行速度提升比例；
- P_{R1}, P_{R2}, P_{R3} ：道路车辆、轨道车辆、船舶运行速度提升比例；
- $v_{*,0}, v_{*,1}$ ：自主式交通系统部署前后所有车辆（船舶）运行速度，km/h；

v_{R1} ， v_{R2} ， v_V ：道路车辆运行速度，轨道车辆运行速度，船舶运行速度，km/h。

8.2.2.1 道路车辆运行速度

8.2.2.1.1 指标定义

道路车辆在某一特定区间内行驶的平均速度。

8.2.2.1.2 指标算法

道路车辆运行速度算法如公式（38）所示。

$$v_{R1} = \frac{L}{t} \quad (38)$$

式中：

v_{R1} ：道路车辆运行速度，km/h；

L ：行程长度，km；

t ：行驶的时间，h。

8.2.2.2 轨道车辆运行速度

8.2.2.1.1 指标定义

列车在正线区段（不含折返、出入库等非运营线路）从起点站发车至终点站到站期间，扣除中间停站时间后的实际运行速度，反映列车在运营线路上的移动效率。

8.2.2.1.2 指标算法

轨道车辆运行速度算法如公式（39）所示。

$$v_{R2} = \frac{L}{t} \quad (39)$$

式中：

v_{R2} ：旅行速度，km/h；

L ：线路运营长度，即起点站至终点站的正线里程，km；

t ：单程纯运行时间，指列车在区间内实际移动时间的总和（不含停站时间），h。

8.2.2.3 船舶运行速度

8.2.2.3.1 指标定义

即船舶停泊、锚泊、航行等三个阶段使用时间去除以航程。

8.2.2.3.2 指标算法

船舶运行速度算法如公式（40）所示。

$$v_V = \frac{L}{t_B + t_A + t_U} \quad (40)$$

式中：

v_V ：船舶平均航行速度，km/h；

L ：里程，km；

t_B t_A t_U ：分别为船舶停泊、锚泊、航行所使用的时间，h。

8.3 区域通行效率提升综合指数

8.3.1 指标定义

自主式交通系统部署前后，区域内在单位时间内通过的交通实体总量与平均速度的综合指数上升比例，主要面向大规模拥堵疏导场景。

8.3.2 指标算法

区域通行效率提升综合指数算法如公式（41）-（42）所示。

$$P_{IE} = (I_1 - I_0) / I_0 \quad (41)$$

$$I = \omega_1 \times Q_{act} / Q_{max} + \omega_2 \times v_{avg} / v_{free} \quad (42)$$

式中：

P_{IE} ：区域通行效率提升综合指数；

I_0 ：自主式交通系统部署前区域通行效率；

I_1 ：自主式交通系统部署后区域通行效率；

I ：区域通行效率；

ω_1 ， ω_2 ：权重系数， $\omega_1 + \omega_2 = 1$ （建议 $\omega_1 = 0.6$ ， $\omega_2 = 0.4$ ）；

Q_{act} ：实际观测交通流量，veh/h；

Q_{max} ：道路理论最大通行能力，veh/h；

v_{avg} ：区域交通实体平均速度，km/h；

v_{free} ：自由流速度，km/h。

8.4 应急任务行程时间降低比率

8.4.1 指标定义

自主式交通系统部署前后，执行紧急任务（如消防、救护）的车辆，从出发地到目的地的总行程时间减少比例。主要面向应急车辆优先通行业务场景。

8.4.2 指标算法

应急任务行程时间降低比率算法如公式（43）所示。

$$P_{emergency} = (T_{emergency,0} - T_{emergency,1}) / T_{emergency,0} \quad (43)$$

式中：

$P_{\text{emergency}}$: 通行时间减少比例;

$T_{\text{emergency},0}$: 自主式交通系统部署前紧急任务全程通行时间, s;

$T_{\text{emergency},1}$: 自主式交通系统部署后紧急任务全程通行时间, s。

8.5 系统级能耗与排放降低率

8.5.1 指标定义

自主式交通系统部署前后, 通过群智决策协同优化等手段, 使区域内总交通能耗和污染物排放的降低比例。

8.5.2 指标算法

系统级能耗与排放降低率指数算法如公式 (44) - (45) 所示。

$$P_e = \frac{e_0 - e_1}{e_0} \quad (44)$$

$$P_c = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \quad (45)$$

式中:

P_e : 自主式交通系统部署前后区域内总交通能耗降低比例;

P_c : 自主式交通系统部署前后区域内污染物排放的降低比例;

e_0, e_1 : 自主式交通系统部署前后区域内交通能耗, MJ;

c_0, c_1 : 自主式交通系统部署前后区域内污染物排放, kg。

8.6 动态适应性

8.6.1 指标定义

动态适应性是指自主式交通系统在遇到新的交通场景或实体时能够自动调整, 保持互操作性的性能。可采用增量学习能力、异常恢复能力等指标评价。

8.6.2 指标算法

增量学习能力是自主式交通系统在遇到新的交通场景或实体时正确响应及处理的能力, 采用正确响应及处理数量与总样本数的比值评估, 算法如公式 (46) 所示。

$$I_f = \frac{N_T}{N_{\text{total}}} \quad (46)$$

式中:

I_f : 增量学习过程中的正确率;

N_T : 正确响应及处理次数;

N_{total} : 总触发次数。

异常恢复能力指系统在遭遇硬件故障、软件错误、网络中断或外部攻击等异常事件时，通过自主检测、隔离故障、快速恢复服务，并维持核心功能连续性的综合能力，算法如公式（47）所示。

$$T_r = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{repair},i}}{n} \quad (47)$$

式中：

T_r ：平均异常恢复时间，s；

n ：故障次数；

$T_{\text{repair},i}$ ：第*i*次故障恢复时间，s。

8.7 虚假主体互操作识别率

8.7.1 指标定义

虚假主体互操作识别率是指在互操作通信系统中，系统能够准确识别出虚假主体的能力。具体来说，它是所有虚假主体中被系统成功识别出来的比例。

8.7.2 指标算法

虚假主体互操作识别率算法公式（48）所示。

$$R_f = N_f / N_{\text{total}} \quad (48)$$

式中：

R_f ：虚假主体互操作识别率；

N_f ：识别出来的虚假主体样本数；

N_{total} ：虚假主体样本总数。

8.8 安全标准符合性

安全标准符合性是指自主式交通主体在系统架构设计、技术实现和协议交互等层面，全面符合现行国家及行业安全标准强制性要求的能力特性。具体包括但不限于：满足GB/T 40861-2021《汽车信息安全通用技术要求》的信息安全规范、GB/T 34590-2022《道路车辆功能安全》的功能安全要求、GB 44495-2024《自动驾驶系统通用技术要求》的安全条款，以及YD/T 3751-2020《基于LTE的车联网无线通信技术安全技术要求》的通信安全规定。

附录 A
(资料性)
语义规则合理性案例

A.1 规则集合 R

表1 规则集合

规则 ID	执行顺序	规则逻辑 (自然语言)	规则形式化表达
r_1	1	施工路段限速为原速的 50%	IF road_type == "construction" THEN speed_limit = original_speed * 0.5
r_2	2	学校周边施工时段 (7:00-18:00) 限速 30km/h	IF road_type == "construction" AND near("school") AND (07:00 < current_time < 18:00) THEN speed_limit = 30
r_3	3	暴雨天气下施工路段限速再降低 20%	IF road_type == "construction" AND weather == "heavy_rain" THEN speed_limit *= 0.8

A.2 标注数据集 D (10 条样本示例)

表2 标注数据集D

样本 ID	输入文本/数据	人工标注合理限速 (km/h)	适用规则
1	"朝阳路东段施工, 当前限速 60"	30	r_1
2	"实验小学西门施工, 时间 15:30, 晴"	30	r_1, r_2
3	"暴雨, 东区施工路段原限速 40"	16	r_1, r_3
4	"非施工路段, 限速 80"	80	无
5	"大学城周边施工, 时间 19:00, 当前限速 50"	25	r_1

表2 标注数据集D (续)

样本 ID	输入文本/数据	人工标注合理限速 (km/h)	适用规则
6	"暴雨, 学校周边施工, 时间 08:00"	24	r_1, r_2, r_3
7	"隧道内施工, 原限速 60"	60	无 (隧道特殊规则未覆盖)
8	"商业区施工, 当前限速 40, 小雨"	20	r_1
9	"学校周边施工, 时间 06:00"	50	r_1
10	"暴雨, 非施工路段限速 100"	100	无

A.3 合理性计算过程

A.3.1 规则匹配与适用性统计

表3 规则匹配与适用性统计

规则 ID	适用样本数 (样本)	正确样本数 (样本)	错误样本数 (样本)	冲突样本数 (冲突说明)
r_1	7 (1,2,3,5,6,8,9)	3 (1,5,8)	4 (2,3,6,9)	1 (3 与 r_3 冲突)
r_2	2 (2,6)	1 (2)	1 (6)	1 (6 与 r_3 冲突)
r_3	2 (3,6)	2 (3,6)	0	2 (3 r_1 冲突, 6 与 r_2 冲突)

A.3.2 计算结果

$$S_{r_1} = 3/7 = 0.43, \quad S_{r_2} = 1/2 = 0.50, \quad S_{r_3} = 1/1 = 1$$

$$S_r = (S_{r_1} + S_{r_2} + S_{r_3})/3 = 0.64$$

中国智能交通产业联盟

T/ITS 0299-2025

中国智能交通产业联盟
标准

自主式交通系统 交通主体互操作核心能力评价指标体系
T/ITS 0299-2025

北京市海淀区西土城路 8 号 (100088)
中国智能交通产业联盟印刷
网址: <http://www.c-its.org.cn>

2025 年 11 月第一版 2025 年 11 月第一次印刷