



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116090334 A

(43) 申请公布日 2023. 05. 09

(21) 申请号 202211613092.1

(22) 申请日 2022.12.15

(71) 申请人 同济大学

地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72) 发明人 王宇雷 曾宣霖 黄岩军 郭露露

张琳 陈虹

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限

公司 31225

专利代理师 陈金星

(51) Int. Cl.

G06F 30/27 (2020.01)

B60W 60/00 (2020.01)

B60W 50/00 (2006.01)

G06N 3/045 (2023.01)

G06F 111/04 (2020.01)

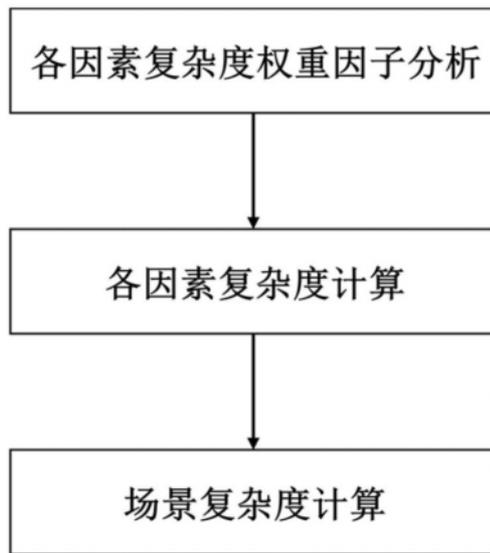
权利要求书5页 说明书25页 附图23页

(54) 发明名称

一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法,包括以下步骤:确定自动驾驶任务中的复杂度权重因子;基于自动驾驶任务中的复杂度权重因子,构建自动驾驶任务复杂度模型;基于自动驾驶任务复杂度模型,构建场景复杂度模型;其中,自动驾驶任务包括定位任务、感知任务及控制任务。与现有技术相比,本发明从动态驾驶任务中涉及的定位任务、感知任务和控制任务三个方面出发,分别考虑各因素的复杂度及其权重因子,建立了具有类神经网络结构的场景复杂度模型,可以为自动驾驶汽车测试与评价、行业标准以及相关法律法规制定提供理论基础和科学依据。



1. 一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法,其特征在于,包括以下步骤:
 确定自动驾驶任务中的复杂度权重因子;
 基于所述自动驾驶任务中的复杂度权重因子,构建自动驾驶任务复杂度模型;
 基于所述自动驾驶任务复杂度模型,构建场景复杂度模型;
 其中,所述自动驾驶任务包括定位任务、感知任务及控制任务。

2. 根据权利要求1所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法,其特征在于,构建定位任务复杂度模型,包括以下步骤:

建立定位层,即定位任务的输出层,定位层的输入变量为 $C_{\text{localization},2}$:

$$C_{\text{localization},2} = [C_{\text{localization},2,1}, C_{\text{localization},2,2}]^T$$

式中, $C_{\text{localization},2,1}$ 表示定位任务中定位方案1的复杂度, $C_{\text{localization},2,2}$ 表示定位任务中定位方案2的复杂度;

定位方案1的复杂度 $C_{\text{localization},2,1}$ 为固定值;

定位方案2的复杂度 $C_{\text{localization},2,2}$ 为:

$$C_{\text{localization},2,2} = \text{Relu}1(L) = \min(1, \max(0, \bar{L})) \in [0,1]$$

式中,L为实际场景中的行驶里程数, \bar{L} 为L的归一化值,且 $\bar{L} \in [0,1]$;

定位任务的复杂度模型表示为:

$$\begin{aligned} C_{\text{localization},1} &= \text{Relu}1(C_{\text{localization},2}) \\ &= \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{localization},2}^T C_{\text{localization},2}\right)\right) \in [0,1] \end{aligned}$$

其中, $\omega_{\text{localization},2}$ 表示定位任务中各个定位方案的复杂度权重因子。

3. 根据权利要求2所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法,其特征在于,所述定位任务中各个定位方案的复杂度权重因子 $\omega_{\text{localization},2}$ 的表达式为:

$$\omega_{\text{localization},2} = [\omega_{\text{localization},2,1}, \omega_{\text{localization},2,2}]^T$$

式中, $\omega_{\text{localization},2,1}$ 表示定位任务中定位方案1的复杂度权重因子, $\omega_{\text{localization},2,2}$ 表示定位任务中定位方案2的复杂度权重因子,满足:

$$\omega_{\text{localization},2,1} + \omega_{\text{localization},2,2} = 1。$$

4. 根据权利要求1所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法,其特征在于,构建感知任务复杂度模型,包括以下步骤:

建立感知层,即感知任务的输出层,感知层的输入变量为 $C_{\text{perception},2}$:

$$C_{\text{perception},2} = [C_{\text{perception},2,1}, \dots, C_{\text{perception},2,n}]^T$$

式中, $C_{\text{perception},2,1}, \dots, C_{\text{perception},2,n}$ 分别表示动态元素1, \dots , n对场景的复杂度,n为最大动态元素的个数;

感知任务的复杂度模型表示为:

$$\begin{aligned} C_{\text{perception},1} &= \text{Relu}1(C_{\text{perception},2}) \\ &= \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{perception},2}^T C_{\text{perception},2} + \rho_{\text{sense}}\right)\right) \in [0,1] \end{aligned}$$

其中, $\omega_{\text{perception},2}$ 表示感知任务的复杂度权重因子, ρ_{sense} 的表达式为:

$$\rho_{\text{sense}} = (1 - \text{sign}(\rho_{V2X})) \text{sign}(\rho_{\text{sense}}) \rho_{\text{sensor}} - \text{sign}(\rho_{V2X}) \rho_{V2X}$$

式中, ρ_{sensor} 用于描述光照及雨雪雾天气要素引起的感知衰减程度, 且 $\rho_{\text{sensor}} \in [0, 1]$; ρ_{V2X} 用于描述V2X增强能力, 且 $\rho_{V2X} \in [0, 1]$ 。

5. 根据权利要求4所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法, 其特征在于, 所述感知任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{perception},2}$ 的表达式为:

$$\omega_{\text{perception},2} = [\omega_{\text{perception},2,1}, \dots, \omega_{\text{perception},2,n}]^T$$

式中 $\omega_{\text{perception},2,1}, \dots, \omega_{\text{perception},2,n}$ 分别表示动态元素1, \dots , n对场景的复杂度权重因子, 且满足:

$$\omega_{\text{perception},2,i} = 1/n。$$

6. 根据权利要求1所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法, 其特征在于, 控制任务包括非碰撞类控制任务及碰撞类控制任务;

所述非碰撞类控制任务包括纵向无约束类控制任务及纵向有约束类控制任务;

所述纵向有约束类控制任务包括距离约束、速度约束及交通灯约束;

所述碰撞类控制任务包括加速/制动类控制任务及强制换道类控制任务。

7. 根据权利要求6所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法, 其特征在于, 构建控制任务复杂度模型, 包括以下步骤:

建立控制层, 即控制任务的输出层, 控制层的输入变量为 $C_{\text{control},2}$:

$$C_{\text{control},2} = [C_{\text{control},2,1}, C_{\text{control},2,2}]^T$$

式中, $C_{\text{control},2,1}$ 表示非碰撞类控制任务的复杂度, $C_{\text{control},2,2}$ 表示碰撞类控制任务的复杂度;

控制任务的复杂度模型表示为:

$$C_{\text{control},1} = \text{Relu1}(C_{\text{control},2}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},2}^T C_{\text{control},2})) \in [0, 1]$$

其中, $\omega_{\text{control},2}$ 表示控制任务的复杂度权重因子;

非碰撞类控制任务复杂度 $C_{\text{control},2,1}$ 包括纵向无约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,1}$ 和纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$;

非碰撞类控制层的输入变量为:

$$C_{\text{control},3,1} = [C_{\text{control},3,1,1}, C_{\text{control},3,1,2}]^T$$

非碰撞类控制任务复杂度模型表示为:

$$C_{\text{control},2,1} = \text{Relu1}(C_{\text{control},3,1}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},3,1}^T C_{\text{control},3,1})) \in [0, 1]$$

其中, $\omega_{\text{control},3,1}$ 表示各个非碰撞类控制任务的复杂度权重因子;

所述纵向无约束类控制任务的复杂度模型 $C_{\text{control},3,1,1}$ 表示为:

$$C_{\text{control},3,1,1} = \text{Relu1}(V_0) = \min(1, \max(0, \bar{V}_0) + \rho_{\text{control}}) \in [0, 1]$$

其中, V_0 为车辆初始车速, \bar{V}_0 为车辆初始车速的归一化值; ρ_{control} 为控制难度系数;

所述纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$ 包括距离约束 $C_{\text{control},4,1,1}$ 、速度约束 $C_{\text{control},4,1,2}$ 及交通灯约束 $C_{\text{control},4,1,3}$;

纵向有约束非碰撞类控制层的输入变量为:

$$C_{\text{control},4,1} = [C_{\text{control},4,1,1}, C_{\text{control},4,1,2}, C_{\text{control},4,1,3}]^T$$

纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$ 的复杂度模型表示为:

$$C_{\text{control},3,1,2} = \text{Relu1}(C_{\text{control},4,1}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},4,1}^T C_{\text{control},4,1})) \in [0,1]$$

其中, $\omega_{\text{control},4,1}$ 表示各个纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子;

所述距离约束 $C_{\text{control},4,1,1}$ 的复杂度模型为:

$$C_{\text{control},4,1,1} = \text{Relu1}(\text{THW}) = \min(1, \max(0, \overline{1/\text{THW}} + \rho_{\text{control}})) \in [0,1]$$

式中, THW为车头时距, $\overline{1/\text{THW}}$ 为THW倒数的归一化值;

所述速度约束 $C_{\text{control},4,1,2}$ 的复杂度模型为:

$$C_{\text{control},4,1,2} = \text{Relu1}(\Delta V) = \min(1, \max(0, \overline{\Delta V} + \rho_{\text{control}})) \in [0,1]$$

式中, ΔV 为速度差, $\overline{\Delta V}$ 为速度差的归一化值;

所述交通灯约束 $C_{\text{control},4,1,3}$ 的复杂度模型为:

$$C_{\text{control},4,1,3} = \begin{cases} \text{Relu1}(0) = \min(1, \max(0, \rho_{\text{control}})) & \Delta T \leq 0 \\ \text{Relu1}(\Delta T) = \min(1, \overline{1/\Delta T} + \rho_{\text{control}}) \in [0,1] & \Delta T > 0 \end{cases}$$

式中, ΔT 为车头时距THW与黄灯时长的时间差, $\overline{\Delta T}$ 为时间差的归一化值;

所述碰撞类控制任务 $C_{\text{control},2,2}$ 包括加速/制动类控制任务 $C_{\text{control},3,2,1}$ 及强制换道类控制任务 $C_{\text{control},3,2,2}$;

碰撞类层的输入变量为:

$$C_{\text{control},3,2} = [C_{\text{control},3,2,1}, C_{\text{control},3,2,2}]^T$$

所述碰撞类控制任务 $C_{\text{control},2,2}$ 的复杂度模型表示为:

$$C_{\text{control},2,2} = \text{Relu1}(C_{\text{control},3,2}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},3,2}^T C_{\text{control},3,2})) \in [0,1]$$

其中, $\omega_{\text{control},3,2}$ 表示各个碰撞类控制任务的复杂度权重因子;

所述加速/制动类控制任务 $C_{\text{control},3,2,1}$ 的复杂模型表示为:

$$\begin{aligned} C_{\text{control},3,2,1} &= \text{Relu1}(TTC, \Delta V_1) \\ &= \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},3,2,1,1} \overline{1/TTC} + \omega_{\text{control},3,2,1,2} \overline{\Delta V_1} + \rho_{\text{control}})) \in [0,1] \end{aligned}$$

式中, TTC为碰撞时间, $\overline{1/TTC}$ 为TTC倒数的归一化值; ΔV_1 为碰撞相对速度, $\overline{\Delta V_1}$ 为碰撞相对速度的归一化值; $\omega_{\text{control},3,2,1,1}$ 为 $\overline{1/TTC}$ 的权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,1,2}$ 为 $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子;

所述强制换道类控制任务 $C_{\text{control},3,2,2}$ 的复杂模型表示为:

$$C_{\text{control},3,2,2} = \text{Relu1}(TLC, \Delta V_1) \\ = \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{control},3,2,2,1} \overline{1/TLC} + \omega_{\text{control},3,2,2,2} \Delta V_1 + \rho_{\text{control}}\right)\right) \in [0,1]$$

式中, TLC为允许换道时间, $\overline{1/TLC}$ 为允许换道时间倒数的归一化值; $\omega_{\text{control},3,2,2,1}$ 为 $\overline{1/TLC}$ 的权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,2,2}$ 为 ΔV_1 的权重因子;

$$\rho_{\text{control}} = \max\{\rho_{\text{curvature}}, \rho_{\text{slope}}, \rho_{\text{friction}}\}。$$

8. 根据权利要求7所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法, 其特征在于, 所述控制难度系数 ρ_{control} 的表达式为:

$$\rho_{\text{control}} = \max\{\rho_{\text{curvature}}, \rho_{\text{slope}}, \rho_{\text{friction}}\}$$

$$\rho_{\text{curvature}} = \bar{\kappa}$$

$$\rho_{\text{slope}} = \bar{\theta}$$

$$\rho_{\text{friction}} = 1 - \bar{\mu}$$

式中, $\bar{\kappa}$ 表示归一化道路曲率, $\bar{\theta}$ 表示归一化道路坡度, $\bar{\mu}$ 表示摩擦系数。

9. 根据权利要求7所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法, 其特征在于, 所述控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},2}$ 的表达式为:

$$\omega_{\text{control},2} = \left[\omega_{\text{control},2,1}, \omega_{\text{control},2,2} \right]^T$$

式中, $\omega_{\text{control},2,1}$ 表示非碰撞类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},2,2}$ 表示碰撞类控制任务的复杂度权重因子, 满足:

$$\omega_{\text{control},2,1} + \omega_{\text{control},2,2} = 1$$

所述各个非碰撞类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},3,1}$ 的表达式为:

$$\omega_{\text{control},3,1} = \left[\omega_{\text{control},3,1,1}, \omega_{\text{control},3,1,2} \right]^T$$

式中, $\omega_{\text{control},3,1,1}$ 表示纵向无约束类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},3,1,2}$ 表示纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子, 满足:

$$\omega_{\text{control},3,1,1} + \omega_{\text{control},3,1,2} = 1$$

所述各个纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},4,1}$ 的表达式为:

$$\omega_{\text{control},4,1} = \left[\omega_{\text{control},4,1,1}, \omega_{\text{control},4,1,2}, \omega_{\text{control},4,1,3} \right]^T$$

式中, $\omega_{\text{control},4,1,1}$, $\omega_{\text{control},4,1,2}$ 和 $\omega_{\text{control},4,1,3}$ 分别表示距离约束、速度约束和交通灯约束的复杂度权重因子, 满足:

$$\sum_{i=1}^3 \omega_{\text{control},4,1,i} = 1$$

所述各个碰撞类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},3,2}$ 的表达式为:

$$\omega_{\text{control},3,2} = \left[\omega_{\text{control},3,2,1}, \omega_{\text{control},3,2,2} \right]^T$$

式中, $\omega_{\text{control},3,2,1}$ 表示加速/制动类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,2}$ 表示强制换道类控制任务的复杂度权重因子, 满足:

$$\omega_{\text{control},3,2,1} + \omega_{\text{control},3,2,2} = 1$$

所述 $\overline{1/TTC}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,1,1}$ 与 $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,1,2}$ 满足:

$$\omega_{\text{control},3,2,1,1} + \omega_{\text{control},3,2,1,2} = 1$$

所述 $\overline{1/TLC}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,2,1}$ 与 $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,2,2}$ 满足:

$$\omega_{\text{control},3,2,2,1} + \omega_{\text{control},3,2,2,2} = 1。$$

10. 根据权利要求1所述的一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法,其特征在于,所述构建场景复杂度模型包括以下步骤:

建立场景复杂度模型输出层:

$$SC = 100 \times \text{Relu1}(C) = 100 \min(1, \max(0, \omega_1^\top C)) \in [0, 100]$$

式中, $\omega_1 = [\omega_{\text{localization},1}, \omega_{\text{perception},1}, \omega_{\text{control},1}]^\top$, $\omega_{\text{localization},1}$ 、 $\omega_{\text{perception},1}$ 和 $\omega_{\text{control},1}$ 分别表示定位任务、感知任务和控制任务的复杂度权重因子,满足:

$$\omega_{\text{localization},1} + \omega_{\text{perception},1} + \omega_{\text{control},1} = 1$$

输出层的输入变量 $C = [C_{\text{localization},1}, C_{\text{perception},1}, C_{\text{control},1}]^\top$, $C_{\text{localization},1}$ 、 $C_{\text{perception},1}$ 和 $C_{\text{control},1}$ 分别表示定位任务、感知任务和控制任务的复杂度。

一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法

技术领域

[0001] 本发明涉及自动驾驶技术领域,尤其是涉及一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法。

背景技术

[0002] 自动驾驶汽车是未来汽车科技的战略制高点。自动驾驶汽车快速发展的进程中,带来的交通安全问题也逐渐引起人们的关注,自动驾驶汽车的安全可靠性问题至关重要。然而,自动驾驶汽车的标准还未形成、市场机制没有得到验证、相关制度尚未健全是目前制约自动驾驶汽车发展的瓶颈。科学完善的测试评价体系对提高自动驾驶汽车的研发效率、健全技术标准和法律法规、推进产业创新发展至关重要。

[0003] 自动驾驶汽车场景复杂度研究可以为自动驾驶汽车测试与评价、行业标准以及相关法律法规制定提供理论基础和科学依据,具有重大的研究意义。通过对自动驾驶汽车行驶环境、行驶任务的属性和特征的研究,形成了自动驾驶汽车场景复杂度模型。

[0004] 当前,国内外有关场景复杂度的研究较少,大部分研究以传统汽车的视角分析交通场景复杂度,缺乏从自动驾驶汽车视角分析的场景复杂度评估,同时在定量化建模与分析、场景元素全面性等方面也有待进一步完善。

[0005] 目前以自动驾驶汽车的角度开展场景复杂度的研究一部分来源于自动驾驶汽车的测评体系,存在对自动驾驶汽车测试场景的复杂度量较为粗糙、没有明确的量化标准等缺陷。另外,现有相关场景复杂度的研究主要集中于测试场景中任务的制定,如何剔除测试、场景、环境和智能度对任务复杂度的干扰,以及定量计算任务复杂度等研究尚不明确。

发明内容

[0006] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法。本发明从自动驾驶任务中涉及的定位任务、感知任务和控制任务三个方面出发,分别考虑各因素的复杂度及其权重因子,建立具有类神经网络结构的场景复杂度模型,该模型可以为自动驾驶汽车测试与评价、行业标准以及相关法律法规制定提供理论基础和科学依据。

[0007] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0008] 一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法,包括以下步骤:

[0009] S1、确定自动驾驶任务中的复杂度权重因子;

[0010] S2、基于所述自动驾驶任务中的复杂度权重因子,构建自动驾驶任务复杂度模型;

[0011] S3、基于所述自动驾驶任务复杂度模型,构建场景复杂度模型;

[0012] 其中,所述自动驾驶任务包括定位任务、感知任务及控制任务。

[0013] 进一步地,构建定位任务复杂度模型,包括以下步骤:

[0014] 建立定位层,即定位任务的输出层,定位层的输入变量为 $C_{\text{localization},2}$:

[0015] $C_{\text{localization},2} = [C_{\text{localization},2,1}, C_{\text{localization},2,2}]^T$

[0016] 式中, $C_{\text{localization},2,1}$ 表示定位任务中定位方案1的复杂度, $C_{\text{localization},2,2}$ 表示定位任务中定位方案2的复杂度;

[0017] 定位方案1的复杂度 $C_{\text{localization},2,1}$ 为固定值;

[0018] 定位方案2的复杂度 $C_{\text{localization},2,2}$ 为:

$$[0019] \quad C_{\text{localization},2,2} = \text{Relu}1(L) = \min(1, \max(0, \bar{L})) \in [0,1]$$

[0020] 式中, L 为实际场景中的行驶里程数, \bar{L} 为 L 的归一化值, 且 $\bar{L} \in [0,1]$;

[0021] 定位任务的复杂度模型表示为:

$$[0022] \quad \begin{aligned} C_{\text{localization},1} &= \text{Relu}1(C_{\text{localization},2}) \\ &= \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{localization},2}^T C_{\text{localization},2}\right)\right) \in [0,1] \end{aligned}$$

[0023] 其中, $\omega_{\text{localization},2}$ 表示定位任务中各个定位方案的复杂度权重因子。至此, 即建立了具有类2层神经网络结构的定位任务复杂度模型。

[0024] 进一步地, 所述定位任务中各个定位方案的复杂度权重因子 $\omega_{\text{localization},2}$ 的表达式为:

$$[0025] \quad \omega_{\text{localization},2} = \left[\omega_{\text{localization},2,1}, \omega_{\text{localization},2,2} \right]^T$$

[0026] 式中, $\omega_{\text{localization},2,1}$ 表示定位任务中定位方案1的复杂度权重因子, $\omega_{\text{localization},2,2}$ 表示定位任务中定位方案2的复杂度权重因子, 满足:

$$[0027] \quad \omega_{\text{localization},2,1} + \omega_{\text{localization},2,2} = 1。$$

[0028] 进一步地, 构建感知任务复杂度模型, 包括以下步骤:

[0029] 建立感知层, 即感知任务的输出层, 感知层的输入变量为 $C_{\text{perception},2}$:

$$[0030] \quad C_{\text{perception},2} = \left[C_{\text{perception},2,1}, \dots, C_{\text{perception},2,n} \right]^T$$

[0031] 式中, $C_{\text{perception},2,1}, \dots, C_{\text{perception},2,n}$ 分别表示动态元素1, \dots , n 对场景的复杂度, n 为最大动态元素的个数;

[0032] 根据小孔成像原理, 感知物体的复杂度与被感知物体大小 H 成反比、与距离 D 成正比,

$$[0033] \quad D = \max(D_{\min} + (V_0 - V_i) T_0, D_0)$$

[0034] 式中, D_{\min} 为最小距离, V_0 为车辆初始车速, V_i 为目标车辆车速, T_0 为时距, D_0 为兴趣距离;

[0035] 因此, 定义归一化后的参数 $\overline{D/H} \in [0,1]$, 设计如下复杂度方程:

$$[0036] \quad C_{\text{perception},2,i} = \text{Relu}1(D/H) = \min(1, \max(0, \overline{D/H})) \in [0,1]$$

[0037] 感知任务的复杂度 $C_{\text{perception},1}$ 不仅与被感知物体个数、大小和距离有关, 而且还跟场景中的光照雨雪雾等负向因素和V2X等正向因素, 因此, 感知任务的复杂度模型表示为:

$$[0038] \quad \begin{aligned} C_{\text{perception},1} &= \text{Relu}1(C_{\text{perception},2}) \\ &= \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{perception},2}^T C_{\text{perception},2} + \rho_{\text{sense}}\right)\right) \in [0,1] \end{aligned}$$

[0039] 其中, $\omega_{\text{perception},2}$ 表示感知任务的复杂度权重因子, ρ_{sense} 的表达式为:

[0040] $\rho_{\text{sense}} = (1 - \text{sign}(\rho_{V2X})) \text{sign}(\rho_{\text{sense}}) \rho_{\text{sensor}} - \text{sign}(\rho_{V2X}) \rho_{V2X}$

[0041] 式中, ρ_{sensor} 用于描述光照及雨雪雾天气要素引起的感知衰减程度, 且 $\rho_{\text{sensor}} \in [0, 1]$; ρ_{V2X} 用于描述V2X增强能力, 且 $\rho_{V2X} \in [0, 1]$ 。

[0042] 假设环境因素不同时出现在同一场景中。因此, 定义:

[0043] $\rho_{\text{sensor}} = \max\{\rho_{\text{illumination}}, \rho_{\text{weather}}, \rho_{\text{particulatematter}}\}$

[0044] $\rho_{\text{illumination}} = \max\{\rho_{\text{day}}, \rho_{\text{dawn}}, \rho_{\text{dusk}}, \rho_{\text{night}}, \dots\}$

[0045] $\rho_{\text{weather}} = \max\{\rho_{\text{wind}}, \rho_{\text{rain}}, \rho_{\text{snow}}, \dots\}$

[0046] $\rho_{\text{particulatematter}} = \max\{\rho_{\text{fog}}, \rho_{\text{smoke}}, \rho_{\text{smog}}, \dots\}$

[0047] 式中, ρ_{xxx} 分别为相应环境参数(归一化)的难度函数。

[0048] 进一步地, 所述感知任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{perception},2}$ 的表达式为:

[0049] $\omega_{\text{perception},2} = [\omega_{\text{perception},2,1}, \dots, \omega_{\text{perception},2,n}]^T$

[0050] 式中 $\omega_{\text{perception},2,1}, \dots, \omega_{\text{perception},2,n}$ 分别表示动态元素1, \dots , n对场景的复杂度权重因子, 且满足:

[0051] $\omega_{\text{perception},2,i} = 1/n$ 。

[0052] 至此即建立了具有类2层神经网络结构的感知任务复杂度模型。如果某一具体的感知任务少于n个目标物, 则相应变量为0, 并且不需要再进行分解计算。

[0053] 进一步地, 控制任务包括非碰撞类控制任务及碰撞类控制任务;

[0054] 所述非碰撞类控制任务包括纵向无约束类控制任务及纵向有约束类控制任务;

[0055] 所述纵向有约束类控制任务包括距离约束、速度约束及交通灯约束;

[0056] 所述碰撞类控制任务包括加速/制动类控制任务及强制换道类控制任务。

[0057] 进一步地, 构建控制任务复杂度模型, 包括以下步骤:

[0058] 建立控制层, 即控制任务的输出层, 控制层的输入变量为 $C_{\text{control},2}$:

[0059] $C_{\text{control},2} = [C_{\text{control},2,1}, C_{\text{control},2,2}]^T$

[0060] 式中, $C_{\text{control},2,1}$ 表示非碰撞类控制任务的复杂度, $C_{\text{control},2,2}$ 表示碰撞类控制任务的复杂度;

[0061] 控制任务复杂度同时与曲率、坡度和摩擦系数等环境因素相关, 控制任务的复杂度模型表示为:

[0062] $C_{\text{control},1} = \text{Relu1}(C_{\text{control},2}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},2}^T C_{\text{control},2})) \in [0, 1]$

[0063] 其中, $\omega_{\text{control},2}$ 表示控制任务的复杂度权重因子;

[0064] 非碰撞类控制任务复杂度 $C_{\text{control},2,1}$ 包括纵向无约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,1}$ 和纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$;

[0065] 非碰撞类控制层的输入变量为:

[0066] $C_{\text{control},3,1} = [C_{\text{control},3,1,1}, C_{\text{control},3,1,2}]^T$

[0067] 非碰撞类控制任务复杂度模型表示为:

[0068] $C_{\text{control},2,1} = \text{Relu1}(C_{\text{control},3,1}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},3,1}^T C_{\text{control},3,1})) \in [0, 1]$

[0069] 其中, $\omega_{\text{control},3,1}$ 表示各个非碰撞类控制任务的复杂度权重因子;

[0070] 根据物理规律,设计纵向无约束类 $C_{\text{control},3,1,1}$ 的复杂度与本车的初始车速 \bar{V}_0 (归一化)成正比。所述纵向无约束类控制任务的复杂度模型 $C_{\text{control},3,1,1}$ 表示为:

$$[0071] \quad C_{\text{control},3,1,1} = \text{Relu}1(V_0) = \min\left(1, \max\left(0, \bar{V}_0\right) + \rho_{\text{control}}\right) \in [0,1]$$

[0072] 其中, V_0 为车辆初始车速, \bar{V}_0 为车辆初始车速的归一化值; ρ_{control} 为控制难度系数;

[0073] 所述纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$ 包括距离约束 $C_{\text{control},4,1,1}$ 、速度约束 $C_{\text{control},4,1,2}$ 及交通灯约束 $C_{\text{control},4,1,3}$;

[0074] 纵向有约束非碰撞类控制层的输入变量为:

$$[0075] \quad C_{\text{control},4,1} = \left[C_{\text{control},4,1,1}, C_{\text{control},4,1,2}, C_{\text{control},4,1,3} \right]^T$$

[0076] 纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$ 的复杂度模型表示为:

$$[0077] \quad C_{\text{control},3,1,2} = \text{Relu}1\left(C_{\text{control},4,1}\right) = \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{control},4,1}^T C_{\text{control},4,1}\right)\right) \in [0,1]$$

[0078] 其中, $\omega_{\text{control},4,1}$ 表示各个纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子;

[0079] 所述距离约束 $C_{\text{control},4,1,1}$ 的复杂度模型为:

$$[0080] \quad C_{\text{control},4,1,1} = \text{Relu}1(\text{THW}) = \min\left(1, \max\left(0, \overline{1/\text{THW}} + \rho_{\text{control}}\right)\right) \in [0,1]$$

[0081] 式中,THW为车头时距, $\overline{1/\text{THW}}$ 为THW倒数的归一化值;

[0082] 根据物理规律,速度约束的难度与速度差 ΔV 成正比,设计所述速度约束 $C_{\text{control},4,1,2}$ 的复杂度模型为:

$$[0083] \quad C_{\text{control},4,1,2} = \text{Relu}1(\Delta V) = \min\left(1, \max\left(0, \overline{\Delta V} + \rho_{\text{control}}\right)\right) \in [0,1]$$

[0084] 式中, ΔV 为速度差, $\overline{\Delta V}$ 为速度差的归一化值;

[0085] 根据物理规律,交通灯约束的难度与THW与黄灯时长之差(=THW-TYL)存在区间关系,设计所述交通灯约束 $C_{\text{control},4,1,3}$ 的复杂度模型为:

$$[0086] \quad C_{\text{control},4,1,3} = \begin{cases} \text{Relu}1(0) = \min\left(1, \max\left(0, \rho_{\text{control}}\right)\right) & \Delta T \leq 0 \\ \text{Relu}1(\Delta T) = \min\left(1, \overline{1/\Delta T} + \rho_{\text{control}}\right) \in [0,1] & \Delta T > 0 \end{cases}$$

[0087] 式中, ΔT 为车头时距THW与黄灯时长的时间差, $\overline{\Delta T}$ 为时间差的归一化值;

[0088] 所述碰撞类控制任务 $C_{\text{control},2,2}$ 包括加速/制动类控制任务 $C_{\text{control},3,2,1}$ 及强制换道类控制任务 $C_{\text{control},3,2,2}$;

[0089] 碰撞类层的输入变量为:

$$[0090] \quad C_{\text{control},3,2} = \left[C_{\text{control},3,2,1}, C_{\text{control},3,2,2} \right]^T$$

[0091] 所述碰撞类控制任务 $C_{\text{control},2,2}$ 的复杂度模型表示为:

$$[0092] \quad C_{\text{control},2,2} = \text{Relu}1\left(C_{\text{control},3,2}\right) = \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{control},3,2}^T C_{\text{control},3,2}\right)\right) \in [0,1]$$

[0093] 其中, $\omega_{\text{control},3,2}$ 表示各个碰撞类控制任务的复杂度权重因子;

[0094] 根据物理规律,加速/制动类控制任务 $C_{\text{control},3,2,1}$ 的复杂度与碰撞时间TTC(Time

To Collision)的倒数成正比,与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。因此,所述加速/制动类控制任务 $C_{\text{control},3,2,1}$ 的复杂模型表示为:

$$\begin{aligned} [0095] \quad C_{\text{control},3,2,1} &= \text{Relu1}(TTC, \Delta V_1) \\ &= \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{control},3,2,1,1} \overline{1/TTC} + \omega_{\text{control},3,2,1,2} \overline{\Delta V_1} + \rho_{\text{control}}\right)\right) \in [0,1] \end{aligned}$$

[0096] 式中, TTC 为碰撞时间, $\overline{1/TTC}$ 为 TTC 倒数的归一化值; ΔV_1 为碰撞相对速度, $\overline{\Delta V_1}$ 为碰撞相对速度的归一化值; $\omega_{\text{control},3,2,1,1}$ 为 $\overline{1/TTC}$ 的权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,1,2}$ 为 $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子;

[0097] 根据物理规律,强制换道类 $C_{\text{control},3,2,2}$ 的复杂度与允许换道时间 TLC (Time of Allowing Lane Change)的倒数成正比,与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。所述强制换道类控制任务 $C_{\text{control},3,2,2}$ 的复杂模型表示为:

$$\begin{aligned} [0098] \quad C_{\text{control},3,2,2} &= \text{Relu1}(TLC, \Delta V_1) \\ &= \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{control},3,2,2,1} \overline{1/TLC} + \omega_{\text{control},3,2,2,2} \Delta V_1 + \rho_{\text{control}}\right)\right) \in [0,1] \end{aligned}$$

[0099] 式中, TLC 为允许换道时间, $\overline{1/TLC}$ 为允许换道时间倒数的归一化值; $\omega_{\text{control},3,2,2,1}$ 为 $\overline{1/TLC}$ 的权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,2,2}$ 为 ΔV_1 的权重因子。

$$[0100] \quad \rho_{\text{control}} = \max\{\rho_{\text{curvature}}, \rho_{\text{slope}}, \rho_{\text{friction}}\}$$

[0101] 至此,即建立了具有类4层神经网络结构的控制任务复杂度模型。如果某一具体的控制任务没有某支子任务类,则相应变量为0,并且不需要再进行分解计算。

[0102] 进一步地,考虑到曲率和坡度不会同时出现,因此设计控制难度系数 ρ_{control} 的表达式为:

$$[0103] \quad \rho_{\text{control}} = \max\{\rho_{\text{curvature}}, \rho_{\text{slope}}, \rho_{\text{friction}}\}$$

$$[0104] \quad \rho_{\text{curvature}} = \bar{\kappa}$$

$$[0105] \quad \rho_{\text{slope}} = \bar{\theta}$$

$$[0106] \quad \rho_{\text{friction}} = 1 - \bar{\mu}$$

[0107] 式中, $\bar{\kappa}$ 表示归一化道路曲率, $\bar{\theta}$ 表示归一化道路坡度, $\bar{\mu}$ 表示摩擦系数;不同任务道路曲率和摩擦系数可能存在差异,因此不同任务的 ρ_{control} 并不相同。 $\rho_{\text{curvature}}$ 表示归一化曲率, ρ_{slope} 表示归一化坡度, ρ_{friction} 表示归一化摩擦系数。

[0108] 进一步地,所述控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},2}$ 的表达式为:

$$[0109] \quad \omega_{\text{control},2} = \left[\omega_{\text{control},2,1}, \omega_{\text{control},2,2} \right]^T$$

[0110] 式中, $\omega_{\text{control},2,1}$ 表示非碰撞类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},2,2}$ 表示碰撞类控制任务的复杂度权重因子,满足:

$$[0111] \quad \omega_{\text{control},2,1} + \omega_{\text{control},2,2} = 1$$

[0112] 所述各个非碰撞类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},3,1}$ 的表达式为:

$$[0113] \quad \omega_{\text{control},3,1} = \left[\omega_{\text{control},3,1,1}, \omega_{\text{control},3,1,2} \right]^T$$

[0114] 式中, $\omega_{\text{control},3,1,1}$ 表示纵向无约束类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},3,1,2}$ 表示纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子, 满足:

$$[0115] \quad \omega_{\text{control},3,1,1} + \omega_{\text{control},3,1,2} = 1$$

[0116] 所述各个纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},4,1}$ 的表达式为:

$$[0117] \quad \omega_{\text{control},4,1} = [\omega_{\text{control},4,1,1}, \omega_{\text{control},4,1,2}, \omega_{\text{control},4,1,3}]^T$$

[0118] 式中, $\omega_{\text{control},4,1,1}$, $\omega_{\text{control},4,1,2}$ 和 $\omega_{\text{control},4,1,3}$ 分别表示距离约束、速度约束和交通灯约束的复杂度权重因子, 满足:

$$[0119] \quad \sum_{i=1}^3 \omega_{\text{control},4,1,i} = 1$$

[0120] 所述各个碰撞类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},3,2}$ 的表达式为:

$$[0121] \quad \omega_{\text{control},3,2} = [\omega_{\text{control},3,2,1}, \omega_{\text{control},3,2,2}]^T$$

[0122] 式中, $\omega_{\text{control},3,2,1}$ 表示加速/制动类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,2}$ 表示强制换道类控制任务的复杂度权重因子, 满足:

$$[0123] \quad \omega_{\text{control},3,2,1} + \omega_{\text{control},3,2,2} = 1$$

[0124] 根据物理规律, 加速/制动类控制任务的复杂度与碰撞时间TTC (Time To Collision) 的倒数成正比, 与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。所述 $1/TTC$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,1,1}$ 与 $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,1,2}$ 满足:

$$[0125] \quad \omega_{\text{control},3,2,1,1} + \omega_{\text{control},3,2,1,2} = 1$$

[0126] 根据物理规律, 强制换道类控制任务的复杂度与允许换道时间TLC (Time of Allowing Lane Change) 的倒数成正比, 与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。所述 $1/TLC$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,2,1}$ 与 $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,2,2}$ 满足:

$$[0127] \quad \omega_{\text{control},3,2,2,1} + \omega_{\text{control},3,2,2,2} = 1。$$

[0128] 进一步地, 所述构建场景复杂度模型包括以下步骤:

[0129] 建立场景复杂度模型输出层:

$$[0130] \quad SC = 100 \times \text{Relu1}(C) = 100 \min(1, \max(0, \omega_1^T C)) \in [0, 100]$$

[0131] 式中, $\omega_1 = [\omega_{\text{localization},1}, \omega_{\text{perception},1}, \omega_{\text{control},1}]^T$, $\omega_{\text{localization},1}$ 、 $\omega_{\text{perception},1}$ 和 $\omega_{\text{control},1}$ 分别表示定位任务、感知任务和控制任务的复杂度权重因子, 满足:

$$[0132] \quad \omega_{\text{localization},1} + \omega_{\text{perception},1} + \omega_{\text{control},1} = 1$$

[0133] 输出层的输入变量 $C = [C_{\text{localization},1}, C_{\text{perception},1}, C_{\text{control},1}]^T$, $C_{\text{localization},1}$ 、 $C_{\text{perception},1}$ 和 $C_{\text{control},1}$ 分别表示定位任务、感知任务和控制任务的复杂度。

[0134] 与现有技术相比, 本发明具有以下有益效果:

[0135] 本发明从动态驾驶任务中涉及的定位任务、感知任务和控制任务三个方面出发, 分别考虑各因素的复杂度及其权重因子, 建立了具有类神经网络结构的场景复杂度模型, 实现对自动驾驶汽车测试场景的复杂度进行精确量化, 得到定量计算的任务复杂度, 可以

为自动驾驶汽车测试与评价、行业标准以及相关法律法规制定提供理论基础和科学依据。

附图说明

- [0136] 图1为本发明实施例中的场景复杂度模型建立流程图；
 [0137] 图2为本发明实施例中的场景复杂度模型构架图；
 [0138] 图3为本发明实施例中定位任务的类2层神经网络结构；
 [0139] 图4为本发明实施例中感知任务的类2层神经网络结构；
 [0140] 图5为本发明实施例中控制任务的类4层神经网络结构；
 [0141] 图6为本发明实施例中的场景1的示意图；
 [0142] 图7为本发明实施例中的A类场景的示意图，其中，(1) - (9) 分别对应场景1至场景9的示意图；
 [0143] 图8为本发明实施例中的B类场景的示意图；其中，(10) - (21) 分别对应场景10至场景21的示意图；
 [0144] 图9为本发明实施例中的C类场景的示意图；其中，(22) - (37) 分别对应场景22至场景37的示意图；
 [0145] 图10为本发明实施例中的D类场景的示意图；其中，(38)、(39) 分别对应场景38及场景39的示意图；
 [0146] 图11为本发明实施例中的E类场景的示意图其中，(40) - (52) 分别对应场景40至场景52的示意图。

具体实施方式

[0147] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。本实施例以本发明技术方案为前提进行实施，给出了详细的实施方式和具体的操作过程，但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0148] 如图1所示，为本实施例提供一种基于自动驾驶的场景复杂度模型构建方法，包括以下步骤：

- [0149] S1、确定自动驾驶任务中的复杂度权重因子；
 [0150] S2、基于自动驾驶任务中的复杂度权重因子，构建自动驾驶任务复杂度模型；
 [0151] S3、基于自动驾驶任务复杂度模型，构建场景复杂度模型；
 [0152] 其中，自动驾驶任务包括定位任务、感知任务及控制任务。

[0153] 构建定位任务复杂度模型，包括以下步骤：

[0154] 建立定位层，即定位任务的输出层，定位层的输入变量为 $C_{\text{localization},2}$ ：

$$[0155] \quad C_{\text{localization},2} = [C_{\text{localization},2,1}, C_{\text{localization},2,2}]^T$$

[0156] 式中， $C_{\text{localization},2,1}$ 表示定位任务中定位方案1的复杂度， $C_{\text{localization},2,2}$ 表示定位任务中定位方案2的复杂度；

[0157] 定位方案1的复杂度 $C_{\text{localization},2,1}$ 为固定值；

[0158] 定位方案2的复杂度 $C_{\text{localization},2,2}$ 为：

$$[0159] \quad C_{\text{localization},2,2} = \text{Relu}1(L) = \min(1, \max(0, \bar{L})) \in [0, 1]$$

[0160] 式中, L 为实际场景中的行驶里程数, \bar{L} 为 L 的归一化值, 且 $\bar{L} \in [0, 1]$;

[0161] 定位任务的复杂度模型表示为:

$$[0162] \quad C_{\text{localization},1} = \text{Relu1}(C_{\text{localization},2}) \\ = \min(1, \max(0, \omega_{\text{localization},2}^T C_{\text{localization},2})) \in [0, 1]$$

[0163] 其中, $\omega_{\text{localization},2}$ 表示定位任务中各个定位方案的复杂度权重因子。至此, 即建立了具有类2层神经网络结构的定位任务复杂度模型, 网络结构如图3所示。

[0164] 构建感知任务复杂度模型, 包括以下步骤:

[0165] 建立感知层, 即感知任务的输出层, 感知层的输入变量为 $C_{\text{perception},2}$:

$$[0166] \quad C_{\text{perception},2} = [C_{\text{perception},2,1}, \dots, C_{\text{perception},2,n}]^T$$

[0167] 式中, $C_{\text{perception},2,1}, \dots, C_{\text{perception},2,n}$ 分别表示动态元素1, \dots , n 对场景的复杂度, n 为最大动态元素的个数;

[0168] 根据小孔成像原理, 感知物体的复杂度与被感知物体大小 H 成反比、与距离 D 成正比,

$$[0169] \quad D = \max(D_{\min} + (V_0 - V_i) T_0, D_0)$$

[0170] 式中, D_{\min} 为最小距离, V_0 为车辆初始车速, V_i 为目标车辆车速, T_0 为时距, D_0 为兴趣距离;

[0171] 因此, 定义归一化后的参数 $\overline{D/H} \in [0, 1]$, 设计如下复杂度方程:

$$[0172] \quad C_{\text{perception},2,i} = \text{Relu1}(D/H) = \min(1, \max(0, \overline{D/H})) \in [0, 1]$$

[0173] 感知任务的复杂度 $C_{\text{perception},1}$ 不仅与被感知物体个数、大小和距离有关, 而且还跟场景中的光照雨雪雾等负向因素和V2X等正向因素, 因此, 感知任务的复杂度模型表示为:

$$[0174] \quad C_{\text{perception},1} = \text{Relu1}(C_{\text{perception},2}) \\ = \min(1, \max(0, \omega_{\text{perception},2}^T C_{\text{perception},2} + \rho_{\text{sense}})) \in [0, 1]$$

[0175] 其中, $\omega_{\text{perception},2}$ 表示感知任务的复杂度权重因子, ρ_{sense} 的表达式为:

$$[0176] \quad \rho_{\text{sense}} = (1 - \text{sign}(\rho_{V2X})) \text{sign}(\rho_{\text{sense}}) \rho_{\text{sensor}} - \text{sign}(\rho_{V2X}) \rho_{V2X}$$

[0177] 式中, ρ_{sensor} 用于描述光照及雨雪雾天气要素引起的感知衰减程度, 且 $\rho_{\text{sensor}} \in [0, 1]$; ρ_{V2X} 用于描述V2X增强能力, 且 $\rho_{V2X} \in [0, 1]$ 。

[0178] 假设环境因素不同时出现在同一场景中。因此, 定义:

$$[0179] \quad \rho_{\text{sensor}} = \max\{\rho_{\text{illumination}}, \rho_{\text{weather}}, \rho_{\text{particulatematter}}\}$$

$$[0180] \quad \rho_{\text{illumination}} = \max\{\rho_{\text{day}}, \rho_{\text{dawn}}, \rho_{\text{dusk}}, \rho_{\text{night}}, \dots\}$$

$$[0181] \quad \rho_{\text{weather}} = \max\{\rho_{\text{wind}}, \rho_{\text{rain}}, \rho_{\text{snow}}, \dots\}$$

$$[0182] \quad \rho_{\text{particulatematter}} = \max\{\rho_{\text{fog}}, \rho_{\text{smoke}}, \rho_{\text{smog}}, \dots\}$$

[0183] 式中, ρ_{xxx} 分别为相应环境参数(归一化)的难度函数。

[0184] 感知任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{perception},2}$ 的表达式为:

$$[0185] \quad \omega_{\text{perception},2} = [\omega_{\text{perception},2,1}, \dots, \omega_{\text{perception},2,n}]^T$$

[0186] 式中 $\omega_{\text{perception},2,1}, \dots, \omega_{\text{perception},2,n}$ 分别表示动态元素 $1, \dots, n$ 对场景的复杂度权重因子,且满足:

[0187] $\omega_{\text{perception},2,i} = 1/n$ 。

[0188] 至此即建立了具有类2层神经网络结构的感知任务复杂度模型,网络结构如图4所示。如果某一具体的感知任务少于 n 个目标物,则相应变量为0,并且不需要再进行分解计算。

[0189] 控制任务包括非碰撞类控制任务及碰撞类控制任务;

[0190] 非碰撞类控制任务包括纵向无约束类控制任务及纵向有约束类控制任务;

[0191] 纵向有约束类控制任务包括距离约束、速度约束及交通灯约束;

[0192] 碰撞类控制任务包括加速/制动类控制任务及强制换道类控制任务。

[0193] 构建控制任务复杂度模型,包括以下步骤:

[0194] 建立控制层,即控制任务的输出层,控制层的输入变量为 $C_{\text{control},2}$:

[0195] $C_{\text{control},2} = [C_{\text{control},2,1}, C_{\text{control},2,2}]^T$

[0196] 式中, $C_{\text{control},2,1}$ 表示非碰撞类控制任务的复杂度, $C_{\text{control},2,2}$ 表示碰撞类控制任务的复杂度;

[0197] 控制任务复杂度同时与曲率、坡度和摩擦系数等环境因素相关,控制任务的复杂度模型表示为:

[0198] $C_{\text{control},1} = \text{Relu1}(C_{\text{control},2}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},2}^T C_{\text{control},2})) \in [0,1]$

[0199] 其中, $\omega_{\text{control},2}$ 表示控制任务的复杂度权重因子;

[0200] 非碰撞类控制任务复杂度 $C_{\text{control},2,1}$ 包括纵向无约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,1}$ 和纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$;

[0201] 非碰撞类控制层的输入变量为:

[0202] $C_{\text{control},3,1} = [C_{\text{control},3,1,1}, C_{\text{control},3,1,2}]^T$

[0203] 非碰撞类控制任务复杂度模型表示为:

[0204] $C_{\text{control},2,1} = \text{Relu1}(C_{\text{control},3,1}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},3,1}^T C_{\text{control},3,1})) \in [0,1]$

[0205] 其中, $\omega_{\text{control},3,1}$ 表示各个非碰撞类控制任务的复杂度权重因子;

[0206] 根据物理规律,设计纵向无约束类 $C_{\text{control},3,1,1}$ 的复杂度与本车的初始车速 \bar{V}_0 (归一化)成正比。纵向无约束类控制任务的复杂度模型 $C_{\text{control},3,1,1}$ 表示为:

[0207] $C_{\text{control},3,1,1} = \text{Relu1}(V_0) = \min(1, \max(0, \bar{V}_0) + \rho_{\text{control}}) \in [0,1]$

[0208] 其中, V_0 为车辆初始车速, \bar{V}_0 为车辆初始车速的归一化值; ρ_{control} 为控制难度系数。

[0209] 纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$ 包括距离约束 $C_{\text{control},4,1,1}$ 、速度约束 $C_{\text{control},4,1,2}$ 及交通灯约束 $C_{\text{control},4,1,3}$;

[0210] 纵向有约束非碰撞类控制层的输入变量为:

$$[0211] \quad C_{\text{control},4,1} = [C_{\text{control},4,1,1}, C_{\text{control},4,1,2}, C_{\text{control},4,1,3}]^T$$

[0212] 纵向有约束类控制任务 $C_{\text{control},3,1,2}$ 的复杂度模型表示为:

$$[0213] \quad C_{\text{control},3,1,2} = \text{Relu1}(C_{\text{control},4,1}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},4,1}^T C_{\text{control},4,1})) \in [0,1]$$

[0214] 其中, $\omega_{\text{control},4,1}$ 表示各个纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子;

[0215] 距离约束 $C_{\text{control},4,1,1}$ 的复杂度模型为:

$$[0216] \quad C_{\text{control},4,1,1} = \text{Relu1}(\text{THW}) = \min(1, \max(0, \overline{1/\text{THW}} + \rho_{\text{control}})) \in [0,1]$$

[0217] 式中, THW为车头时距, $\overline{1/\text{THW}}$ 为THW倒数的归一化值;

[0218] 根据物理规律, 速度约束的难度与速度差 ΔV 成正比, 设计速度约束 $C_{\text{control},4,1,2}$ 的复杂度模型为:

$$[0219] \quad C_{\text{control},4,1,2} = \text{Relu1}(\Delta V) = \min(1, \max(0, \overline{\Delta V} + \rho_{\text{control}})) \in [0,1]$$

[0220] 式中, ΔV 为速度差, $\overline{\Delta V}$ 为速度差的归一化值;

[0221] 根据物理规律, 交通灯约束的难度与THW与黄灯时长之差(=THW-TYL)存在区间关系, 设计交通灯约束 $C_{\text{control},4,1,3}$ 的复杂度模型为:

$$[0222] \quad C_{\text{control},4,1,3} = \begin{cases} \text{Relu1}(0) = \min(1, \max(0, \rho_{\text{control}})) & \Delta T \leq 0 \\ \text{Relu1}(\Delta T) = \min(1, \overline{1/\Delta T} + \rho_{\text{control}}) & \Delta T > 0 \end{cases} \in [0,1]$$

[0223] 式中, ΔT 为车头时距THW与黄灯时长的时间差, $\overline{\Delta T}$ 为时间差的归一化值;

[0224] 碰撞类控制任务 $C_{\text{control},2,2}$ 包括加速/制动类控制任务 $C_{\text{control},3,2,1}$ 及强制换道类控制任务 $C_{\text{control},3,2,2}$;

[0225] 碰撞类层的输入变量为:

$$[0226] \quad C_{\text{control},3,2} = [C_{\text{control},3,2,1}, C_{\text{control},3,2,2}]^T$$

[0227] 碰撞类控制任务 $C_{\text{control},2,2}$ 的复杂度模型表示为:

$$[0228] \quad C_{\text{control},2,2} = \text{Relu1}(C_{\text{control},3,2}) = \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},3,2}^T C_{\text{control},3,2})) \in [0,1]$$

[0229] 其中, $\omega_{\text{control},3,2}$ 表示各个碰撞类控制任务的复杂度权重因子;

[0230] 根据物理规律, 加速/制动类控制任务 $C_{\text{control},3,2,1}$ 的复杂度与碰撞时间TTC (Time To Collision)的倒数成正比, 与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。因此, 加速/制动类控制任务 $C_{\text{control},3,2,1}$ 的复杂模型表示为:

$$[0231] \quad \begin{aligned} C_{\text{control},3,2,1} &= \text{Relu1}(TTC, \Delta V_1) \\ &= \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},3,2,1,1} \overline{1/TTC} + \omega_{\text{control},3,2,1,2} \overline{\Delta V_1} + \rho_{\text{control}})) \in [0,1] \end{aligned}$$

[0232] 式中, TTC为碰撞时间, $\overline{1/TTC}$ 为TTC倒数的归一化值; ΔV_1 为碰撞相对速度, $\overline{\Delta V_1}$ 为碰撞相对速度的归一化值; $\omega_{\text{control},3,2,1,1}$ 为 $\overline{1/TTC}$ 的权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,1,2}$ 为 $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子;

[0233] 根据物理规律,强制换道类 $C_{\text{control},3,2,2}$ 的复杂度与允许换道时间TLC (Time of Allowing Lane Change)的倒数成正比,与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。强制换道类控制任务 $C_{\text{control},3,2,2}$ 的复杂模型表示为:

$$C_{\text{control},3,2,2} = \text{Relu1}(TLC, \Delta V_1)$$

$$[0234] \quad = \min\left(1, \max\left(0, \omega_{\text{control},3,2,2,1} \overline{1/TLC} + \omega_{\text{control},3,2,2,2} \Delta V_1 + \rho_{\text{control}}\right)\right) \in [0,1]$$

[0235] 式中, TLC为允许换道时间, $\overline{1/TLC}$ 为允许换道时间倒数的归一化值;
 $\omega_{\text{control},3,2,2,1}$ 为 $\overline{1/TLC}$ 的权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,2,2}$ 为 ΔV_1 的权重因子。

$$[0236] \quad \rho_{\text{control}} = \max\{\rho_{\text{curvature}}, \rho_{\text{slope}}, \rho_{\text{friction}}\}$$

[0237] 至此,即建立了具有类4层神经网络结构的控制任务复杂度模型,网络结构如图5所示。如果某一具体的控制任务没有某支子任务类,则相应变量为0,并且不需要再进行分解计算。

[0238] 考虑到曲率和坡度不会同时出现,因此设计控制难度系数 ρ_{control} 的表达式为:

$$[0239] \quad \rho_{\text{control}} = \max\{\rho_{\text{curvature}}, \rho_{\text{slope}}, \rho_{\text{friction}}\}$$

$$[0240] \quad \rho_{\text{curvature}} = \bar{\kappa}$$

$$[0241] \quad \rho_{\text{slope}} = \bar{\theta}$$

$$[0242] \quad \rho_{\text{friction}} = 1 - \bar{\mu}$$

[0243] 式中, $\bar{\kappa}$ 表示归一化道路曲率, $\bar{\theta}$ 表示归一化道路坡度, $\bar{\mu}$ 表示摩擦系数。不同任务道路曲率和摩擦系数可能存在差异,因此不同任务的 ρ_{control} 并不相同。

[0244] 控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},2}$ 的表达式为:

$$[0245] \quad \omega_{\text{control},2} = \left[\omega_{\text{control},2,1}, \omega_{\text{control},2,2} \right]^T$$

[0246] 式中, $\omega_{\text{control},2,1}$ 表示非碰撞类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},2,2}$ 表示碰撞类控制任务的复杂度权重因子,满足:

$$[0247] \quad \omega_{\text{control},2,1} + \omega_{\text{control},2,2} = 1$$

[0248] 各个非碰撞类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},3,1}$ 的表达式为:

$$[0249] \quad \omega_{\text{control},3,1} = \left[\omega_{\text{control},3,1,1}, \omega_{\text{control},3,1,2} \right]^T$$

[0250] 式中, $\omega_{\text{control},3,1,1}$ 表示纵向无约束类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},3,1,2}$ 表示纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子,满足:

$$[0251] \quad \omega_{\text{control},3,1,1} + \omega_{\text{control},3,1,2} = 1$$

[0252] 各个纵向有约束类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},4,1}$ 的表达式为:

$$[0253] \quad \omega_{\text{control},4,1} = \left[\omega_{\text{control},4,1,1}, \omega_{\text{control},4,1,2}, \omega_{\text{control},4,1,3} \right]^T$$

[0254] 式中, $\omega_{\text{control},4,1,1}$, $\omega_{\text{control},4,1,2}$ 和 $\omega_{\text{control},4,1,3}$ 分别表示距离约束、速度约束和交通灯约束的复杂度权重因子,满足:

$$[0255] \quad \sum_{i=1}^3 \omega_{\text{control},4,1,i} = 1$$

[0256] 各个碰撞类控制任务的复杂度权重因子 $\omega_{\text{control},3,2}$ 的表达式为:

$$[0257] \quad \omega_{\text{control},3,2} = \left[\omega_{\text{control},3,2,1}, \omega_{\text{control},3,2,2} \right]^T$$

[0258] 式中, $\omega_{\text{control},3,2,1}$ 表示加速/制动类控制任务的复杂度权重因子, $\omega_{\text{control},3,2,2}$ 表示强制换道类控制任务的复杂度权重因子, 满足:

$$[0259] \quad \omega_{\text{control},3,2,1} + \omega_{\text{control},3,2,2} = 1$$

[0260] 根据物理规律, 加速/制动类控制任务的复杂度与碰撞时间TTC(Time To Collision)的倒数成正比, 与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。 $\frac{1}{TTC}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,1,1}$ 与 $\frac{1}{\Delta V_1}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,1,2}$ 满足:

$$[0261] \quad \omega_{\text{control},3,2,1,1} + \omega_{\text{control},3,2,1,2} = 1$$

[0262] 根据物理规律, 强制换道类控制任务的复杂度与允许换道时间TLC(Time of Allowing Lane Change)的倒数成正比, 与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。 $\frac{1}{TLC}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,2,1}$ 与 $\frac{1}{\Delta V_1}$ 的权重因子 $\omega_{\text{control},3,2,2,2}$ 满足:

$$[0263] \quad \omega_{\text{control},3,2,2,1} + \omega_{\text{control},3,2,2,2} = 1。$$

[0264] 构建场景复杂度模型包括以下步骤:

[0265] 建立场景复杂度模型输出层:

$$[0266] \quad SC = 100 \times \text{Relu1}(C) = 100 \min \left(1, \max \left(0, \omega_1^T C \right) \right) \in [0, 100]$$

[0267] 式中, $\omega_1 = \left[\omega_{\text{localization},1}, \omega_{\text{perception},1}, \omega_{\text{control},1} \right]^T$, $\omega_{\text{localization},1}$ 、 $\omega_{\text{perception},1}$ 和 $\omega_{\text{control},1}$ 分别表示定位任务、感知任务和控制任务的复杂度权重因子, 满足:

$$[0268] \quad \omega_{\text{localization},1} + \omega_{\text{perception},1} + \omega_{\text{control},1} = 1$$

[0269] 输出层的输入变量 $C = \left[C_{\text{localization},1}, C_{\text{perception},1}, C_{\text{control},1} \right]^T$, $C_{\text{localization},1}$ 、 $C_{\text{perception},1}$ 和 $C_{\text{control},1}$ 分别表示定位任务、感知任务和控制任务的复杂度。

[0270] 如图2所示, 为本实施例场景复杂度模型构架图, 可分为定位任务、感知任务及控制任务。其中, 定位任务按难易程度, 分为简单的高精度地图+GPS/IMU方案(难度为固定值)和困难的高精度地图+SLAM方案(难度与行车里程成正比); 其中, 感知任务针对不同的感知目标体进行, 其难度与距离/大小成正比, 难度系数与天气(光照、雨雪雾)和V2X有关; 其中, 控制任务按难易程度, 分为简单的非碰撞类和困难的碰撞类。非碰撞类按难易程度, 分为简单的纵向无约束和困难的纵向有约束。其中, 纵向无约束的难度与车速成正比, 难度系数与曲率、坡度、摩擦系数等有关; 纵向有约束分为距离约束、速度约束和交通灯约束。距离约束难度与 $1/THW$ 成正比, 难度系数与曲率、坡度、摩擦系数等有关; 速度约束与速度差成正比, 难度系数与曲率、坡度、摩擦系数等有关; 交通灯约束与 THW -黄灯时长所在区间相关, 难度系数与曲率、坡度、摩擦系数等有关。碰撞类按难易程度, 分为简单的加速/制动类和困难的强制换道类。其中, 加速/制动类难度与 $1/TTC$ 、相对速度成正比, 难度系数与曲率、坡度、摩擦系数等有关; 强制换道类与 $1/\text{可换道时间}$ 、相对速度成正比, 难度系数与曲率、坡度、摩擦系数等有关。

[0271] 本实施例结合百度50场景的数据量化上述场景复杂度模型。其中, 直道宽度 $X_0 =$

3.75m, 十字路口宽度 $L_0=15\text{m}$, 最大支持动态目标数 $n=2$, 其他参数如表1所示。

[0272] 表1场景参数

参数	数值	参数	数值
道路宽度(m)	$X_0=3.75$	汽车宽度(m)	$W_{\text{car}}=1.8$
十字路口宽度(m)	$L_0=15$	人类宽度(m)	$W_{\text{human}}=0.5$
零速距离(m)	$d_0=0.5$	骑行者宽度(m)	$W_{\text{rider}}=1$
兴趣距离(m)	$d_L=10$	最大初始速度(m/s)	$V_{0\text{max}}=33.33$
时距(s)	$t_h=0.3$	最小初始速度(m/s)	$V_{0\text{min}}=0$
最大摩擦系数	$\mu_{\text{max}}=0.8$	最大曲率	$\kappa_{\text{max}}=1/X_0=0.2667$
最小摩擦系数	$\mu_{\text{min}}=0$	最小曲率	$\kappa_{\text{min}}=0$
最大小孔成像	$D_{H\text{max}}=200$	最大坡度	$\theta_{\text{max}}=10\pi/180$
最小小孔成像	$D_{H\text{min}}=0$	最小坡度	$\theta_{\text{min}}=0\pi/180$
最大TTC倒数(s^{-1})	$(1/TTC)_{\text{max}}=4.44$	最大速度差(m/s)	$\Delta V_{\text{max}}=44.44$
最小TTC倒数(s^{-1})	$(1/TTC)_{\text{min}}=0$	最小速度差(m/s)	$\Delta V_{\text{min}}=0$
最大TLC倒数(s^{-1})	$(1/TLC)_{\text{max}}=4.444$	最小TLC倒数(s^{-1})	$(1/TLC)_{\text{min}}=0.6349$
车牌宽度(m)	$W_{\text{plate}}=0.5$	最大THY倒数(s^{-1})	$(1/THY)_{\text{max}}=1.6747$
交通灯宽度(m)	$W_{\text{light}}=0.5$	最小THY倒数(s^{-1})	$(1/THY)_{\text{min}}=0$
最大THW倒数(s^{-1})	$(1/THW)_{\text{max}}=0.278$	最小THW倒数(s^{-1})	$(1/THW)_{\text{min}}=0$

[0275] 步骤一、各因素复杂度权重因子分析：

[0276] 1、定位任务复杂度权重因子分析：

[0277] 定位方案可分为定位方案1“高精度地图+GPS/IMU”和定位方案2“高精度地图+SLAM”。设 $\omega_{\text{localization},2}$ 表示各个定位方案的复杂度权重因子：

$$[0278] \quad \omega_{\text{localization},2} = \left[\omega_{\text{localization},2,1}, \omega_{\text{localization},2,2} \right]^T \quad (1)$$

[0279] 式中， $\omega_{\text{localization},2,1}$ 和 $\omega_{\text{localization},2,2}$ 分别表示定位方案1“高精度地图+GPS/IMU”和定位方案2“高精度地图+SLAM”的复杂度权重因子，同时满足：

$$[0280] \quad \omega_{\text{localization},2,1} + \omega_{\text{localization},2,2} = 1 \quad (2)$$

[0281] 本实施例中，设置 $\omega_{\text{localization},2,1}=0$ ， $\omega_{\text{localization},2,2}=1$ ，即 $\omega_{\text{localization},2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

[0282] 2、感知任务复杂度权重因子分析：

[0283] 该场景复杂度模型中，最大动态元素的个数为2，设 $\omega_{\text{perception},2}$ 表示各个感知任务的复杂度权重因子：

$$[0284] \quad \omega_{\text{perception},2} = \left[\omega_{\text{perception},2,1}, \omega_{\text{perception},2,2} \right]^T \quad (3)$$

[0285] 式中， $\omega_{\text{perception},2,1}$ 和 $\omega_{\text{perception},2,2}$ 分别表示动态元素1和动态元素2对场景的复杂度权重因子，满足规范化和平等性原则，满足：

$$\begin{aligned}
 [0286] \quad \omega_{\text{perception},2,1} &= 1/2 = 0.5 \\
 \omega_{\text{perception},2,2} &= 1/2 = 0.5
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$[0287] \quad \text{即 } \omega_{\text{perception},2} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}。$$

[0288] 3、控制任务复杂度权重因子分析：

[0289] 按照安全水平划分，控制任务分为非碰撞类和碰撞类。非碰撞类又分为纵向无约束类和纵向有约束类，其中纵向有约束类根据场景库样例，分为距离约束、速度约束和交通灯约束；碰撞类分为加速/制动类和强制换道类。

[0290] 设 $\omega_{\text{control},2}$ 表示各个控制任务的复杂度权重因子：

$$[0291] \quad \omega_{\text{control},2} = \left[\omega_{\text{control},2,1}, \omega_{\text{control},2,2} \right]^T \tag{5}$$

[0292] 式中， $\omega_{\text{control},2,1}$ 和 $\omega_{\text{control},2,2}$ 分别表示非碰撞类和碰撞类的复杂度权重因子，同时满足：

$$[0293] \quad \omega_{\text{control},2,1} + \omega_{\text{control},2,2} = 1 \tag{6}$$

$$[0294] \quad \text{设置 } \omega_{\text{control},2,1} = 0.3, \omega_{\text{control},2,2} = 0.7, \text{ 即 } \omega_{\text{control},2} = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.7 \end{bmatrix}。$$

[0295] 设 $\omega_{\text{control},3,1}$ 表示各个非碰撞类的复杂度权重因子：

$$[0296] \quad \omega_{\text{control},3,1} = \left[\omega_{\text{control},3,1,1}, \omega_{\text{control},3,1,2} \right]^T \tag{7}$$

[0297] 式中， $\omega_{\text{control},3,1,1}$ 和 $\omega_{\text{control},3,1,2}$ 分别表示纵向无约束类和纵向有约束类的复杂度权重因子，同时满足：

$$[0298] \quad \omega_{\text{control},3,1,1} + \omega_{\text{control},3,1,2} = 1 \tag{8}$$

$$[0299] \quad \text{设置 } \omega_{\text{control},3,1,1} = 0.2, \omega_{\text{control},3,1,2} = 0.8, \text{ 即 } \omega_{\text{control},3,1} = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.8 \end{bmatrix}。$$

[0300] 设 $\omega_{\text{control},4,1}$ 表示各个纵向有约束类的复杂度权重因子：

$$[0301] \quad \omega_{\text{control},4,1} = \left[\omega_{\text{control},4,1,1}, \omega_{\text{control},4,1,2}, \omega_{\text{control},4,1,3} \right]^T \tag{9}$$

[0302] 式中， $\omega_{\text{control},4,1,1}$ ， $\omega_{\text{control},4,1,2}$ 和 $\omega_{\text{control},4,1,3}$ 分别表示距离约束、速度约束和交通灯约束纵向的复杂度权重因子，同时满足：

$$[0303] \quad \sum_{i=1}^3 \omega_{\text{control},4,1,i} = 1 \tag{10}$$

[0304] 设置 $\omega_{\text{control},4,1,1} = 0.2$ ， $\omega_{\text{control},4,1,2} = 0.2$ ， $\omega_{\text{control},4,1,3} = 0.6$ ，即

$$\omega_{\text{control},4,1} = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.2 \\ 0.6 \end{bmatrix}。$$

[0305] 设 $\omega_{\text{control},3,2}$ 表示各个碰撞类的复杂度权重因子：

$$[0306] \quad \omega_{\text{control},3,2} = \left[\omega_{\text{control},3,2,1}, \omega_{\text{control},3,2,2} \right]^T \quad (11)$$

[0307] 式中, $\omega_{\text{control},3,2,1}$ 和 $\omega_{\text{control},3,2,2}$ 分别表示加速/制动类的复杂度权重因子和强制换道类的复杂度权重因子,同时满足:

$$[0308] \quad \omega_{\text{control},3,2,1} + \omega_{\text{control},3,2,2} = 1 \quad (12)$$

$$[0309] \quad \text{设置 } \omega_{\text{control},3,2,1} = 0.4, \omega_{\text{control},3,2,2} = 0.6, \text{ 即 } \omega_{\text{control},3,2} = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix}。$$

[0310] 根据物理规律,加速/制动类的复杂度与碰撞时间TTC(Time To Collision)的倒数成正比,与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。设此处 $1/TTC$ 的权重因子为 $\omega_{\text{control},3,2,1,1}$, $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子为 $\omega_{\text{control},3,2,1,2}$, $1/TTC$ 和 $\overline{\Delta V_1}$ 是相关变量的归一化数值,满足:

$$[0311] \quad \omega_{\text{control},3,2,1,1} + \omega_{\text{control},3,2,1,2} = 1 \quad (13)$$

[0312] 根据物理规律,强制换道类的复杂度与允许换道时间TLC(Time of Allowing Lane Change)的倒数成正比,与碰撞相对速度 ΔV_1 成正比。设此处 $1/TLC$ 的权重因子为 $\omega_{\text{control},3,2,2,1}$, $\overline{\Delta V_1}$ 的权重因子为 $\omega_{\text{control},3,2,2,2}$, $1/TLC$ 和 $\overline{\Delta V_1}$ 是相关变量的归一化数值,满足:

$$[0313] \quad \omega_{\text{control},3,2,2,1} + \omega_{\text{control},3,2,2,2} = 1 \quad (14)$$

[0314] 由上述设置,列出模型参数如表2所示。

[0315] 表2 模型参数

$\omega_{\text{localization},1} = 0.05$	$\omega_{\text{perception},1} = 0.05$	$\omega_{\text{control},1} = 0.90$	$\omega_{\text{localization},2,1} = 0$
$\omega_{\text{localization},2,2} = 1$	$\omega_{\text{perception},2,1} = 0.5$	$\omega_{\text{perception},2,2} = 0.5$	$\omega_{\text{control},2,1} = 0.3$
$\omega_{\text{control},2,2} = 0.7$	$\omega_{\text{control},3,1,1} = 0.2$	$\omega_{\text{control},3,1,2} = 0.8$	$\omega_{\text{control},4,1,1} = 0.2$
$\omega_{\text{control},4,1,2} = 0.2$	$\omega_{\text{control},4,1,3} = 0.6$	$\omega_{\text{control},3,2,1} = 0.4$	$\omega_{\text{control},3,2,2} = 0.6$

[0317] 步骤二、各因素复杂度计算:

[0318] 下面以百度52场景中的场景1:起步遇相邻车道超车为例进行说明。

[0319] 场景描述:测试车辆静止起步,测试车辆左侧车道线为虚线,右侧车道线为实线,车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 行驶的目标车辆 TV_1 ,目标车辆 TV_1 右侧边界与虚线车道线横向距离为 offset 。目标车辆 TV_1 与测试车辆初始距离为 d ,示意图如图6所示。

[0320] 设置场景参数:

[0321] 目标车辆 TV_1 右侧边界与虚线车道线横向距离为 offset , $\text{offset} = 0.5\text{m}$;

[0322] 两车距离 $d = 10\text{m}$;

[0323] 本车初始速度 $V_0 = 0\text{m/s}$

[0324] 目标车速度 $V_1 = 16.67\text{m/s}$

[0325] 摩擦系数 $\mu = 0.8$;

[0326] 曲率 $\kappa = 0$;

[0327] 坡度 $\theta = 0$;

[0328] V2X增强能力 $\rho_{V2X}=0$

[0329] 感知衰减程度 $\rho_{\text{sensor}}=0$

[0330] 距离 $D_L = \max(d_0 + (V_1 - V_0) t_h, d_L) / \text{offset} = 20$

[0331] 1、定位任务复杂度计算：

[0332] 本实施例采用定位方案1“高精度地图+GPS/IMU”，即 $C_{\text{localization},2,1}=1$ ， $C_{\text{localization},2,2}=0$ 。

$$[0333] \quad C_{\text{localization},2} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

[0334] 定位任务的复杂度：

$$[0335] \quad \begin{aligned} C_{\text{localization},1} &= \text{Relu1}(C_{\text{localization},2}) \\ &= \min(1, \max(0, \omega_{\text{localization},2}^T C_{\text{localization},2})) \in [0,1] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

[0336] 2、感知任务复杂度计算：

[0337] 计算归一化后的参数：

$$[0338] \quad \overline{D/H} = \frac{D_L - D_{H\min}}{D_{H\max} - D_{H\min}} = 0.1 \quad (17)$$

[0339] 动态元素1对场景的复杂度：

$$[0340] \quad \begin{aligned} C_{\text{perception},2,1} &= \text{Relu1}(D/H) \\ &= \min(1, \max(0, \overline{D/H})) \\ &= 0.1 \end{aligned} \quad (18)$$

[0341] 动态元素2对场景的复杂度：

$$[0342] \quad C_{\text{perception},2,2} = 0 \quad (19)$$

[0343] 感知层的输入变量：

$$[0344] \quad C_{\text{perception},2} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[0345] \quad \begin{aligned} \rho_{\text{sense}} &= (1 - \text{sign}(\rho_{V2X})) \text{sign}(\rho_{\text{sense}}) \rho_{\text{sensor}} - \text{sign}(\rho_{V2X}) \rho_{V2X} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

[0346] 故感知任务的复杂度：

$$[0347] \quad \begin{aligned} C_{\text{perception},1} &= \text{Relu1}(C_{\text{perception},2}) \\ &= \min(1, \max(0, \omega_{\text{perception},2}^T C_{\text{perception},2} + \rho_{\text{sense}})) \\ &= 0.05 \end{aligned} \quad (22)$$

[0348] 3、控制任务复杂度计算：

[0349] 该控制任务属于纵向无约束类的非碰撞任务，所以

$$[0350] \quad C_{\text{control},3,1,2} = 0 \quad (23)$$

$$[0351] \quad C_{\text{control},2,2} = 0 \quad (24)$$

[0352] 计算归一化后的参数：

$$[0353] \quad \text{归一化速率 } \bar{V}_0 = \frac{V_0 - V_{0\min}}{V_{0\max} - V_{0\min}} = 0$$

$$[0354] \quad \text{归一化曲率 } \rho_{\text{curvature}} = \bar{\kappa} = \frac{\kappa - \kappa_{\min}}{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}} = 0$$

$$[0355] \quad \text{归一化坡度 } \rho_{\text{slope}} = \bar{\theta} = \frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} = 0$$

$$[0356] \quad \text{归一化摩擦系数 } \rho_{\text{friction}} = 1 - \bar{\mu} = 1 - \frac{\mu - \mu_{\min}}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} = 0$$

$$[0357] \quad \text{控制难度系数 } \rho_{\text{control}} = \max\{\rho_{\text{curvature}}, \rho_{\text{slope}}, \rho_{\text{friction}}\} = 0$$

[0358] 该控制任务属于纵向无约束类,因此：

$$C_{\text{control},3,1,1} = \text{Relu1}(V_0)$$

$$[0359] \quad \begin{aligned} &= \min(1, \max(0, \bar{V}_0) + \rho_{\text{control}}) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

[0360] 非碰撞类控制层的输入变量为：

$$C_{\text{control},3,1} = [C_{\text{control},3,1,1}, C_{\text{control},3,1,2}]^T$$

$$[0361] \quad = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

[0362] 所以非碰撞类复杂度 $C_{\text{control},2,1}$ 为：

$$C_{\text{control},2,1} = \text{Relu1}(C_{\text{control},3,1})$$

$$[0363] \quad \begin{aligned} &= \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},3,1}^T C_{\text{control},3,1})) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

$$C_{\text{control},1} = \text{Relu1}(C_{\text{control},2})$$

$$[0364] \quad \begin{aligned} &= \min(1, \max(0, \omega_{\text{control},2}^T C_{\text{control},2})) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (28)$$

[0365] 步骤三、场景复杂度计算：

[0366] 设置 $\omega_{\text{localization},1} = 0.05$, $\omega_{\text{perception},1} = 0.05$, $\omega_{\text{control},1} = 0.90$,所以：

$$[0367] \quad \omega_1 = [\omega_{\text{localization},1}, \omega_{\text{perception},1}, \omega_{\text{control},1}]^T = \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.05 \\ 0.90 \end{bmatrix} \quad (29)$$

[0368] 由步骤二可得：

$$[0369] \quad C = [C_{\text{localization},1}, C_{\text{perception},1}, C_{\text{control},1}]^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

[0370] 得到场景1的复杂度为:

$$SC = 100 \times \text{Relu1}(C)$$

$$[0371] \quad = 100 \min(1, \max(0, \omega_1^T C)) \quad (31)$$

$$= 0.25$$

[0372] 本实施例中,将百度52场景分成A、B、C、D、E五类,其中A类包括:场景1~场景9;B类包括:场景10~场景21;C类包括:场景22~场景37;D类包括:场景38、场景39;E类包括场景40~场景52。

[0373] 分别设置各自场景参数,再按照上述方法求解场景复杂度,各场景复杂度的得分如表3所示。

[0374] 表3各场景复杂度得分

ID	场景描述	变量	复杂度 SC
场景 1 起步遇 相邻车 道超车	测试车辆静止起步,测试车辆左侧车道线为虚线,右侧车道线为实线,车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 行驶的目标车辆 TV_1 ,目标车辆 TV_1 右侧边界与虚线车道线横向距离为 $offset$ 。目标车辆 TV_1 ,与测试车辆初始距离为 d 。	offset=0.5 d=10 V0=0 V1=16.67 DL=20	0.25
场景 2 直行遇 相邻车 道慢速 车辆	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶,测试车辆左侧车道线为虚线,右侧车道线为实线,车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 行驶的目标车辆 TV_1 ,目标车辆 TV_1 右侧边界与虚线车道线横向距离为 $offset$ 。目标车辆 TV_1 与测试车辆初始纵向距离为 d 。	offset=0.5 d=10 V0=22.22 V1=16.67 DL=20	3.85
场景 3 直行遇 对向车 道行驶 车辆	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶,测试车辆左侧车道线为虚线,右侧车道线为实线,车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 对向行驶的目标车辆,目标车辆左侧边界与虚线车道线横向距离为 $offset$ 。目标车辆与测试车辆初始纵向距离为 d 。	offset=0.5 d=10 V0=22.22 V1=-16.67 DL=24.334	5.7042
场景 4 直行遇 左侧相 邻车道	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶,测试车辆左侧车道线为虚线,右侧车道线为实线,车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 行驶的目标车辆 TV_1 ,目标车辆 TV_1 右侧边界与虚线车道线	offset=0.5 d=10 V0=22.22 V1=27.78 DL=24.334	3.85

[0376]

快速车辆	横向距离为 $offset$ 。目标车辆 TV_1 与测试车辆初始纵向距离为 d 。		
场景 5 直行遇 左侧相 邻车道 慢速车 辆	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 行驶的目标车辆 TV_1 ，目标车辆 TV_1 右侧边界与虚线车道线横向距离为 $offset$ 。目标车辆 TV_1 与测试车辆初始纵向距离为 d 。	$offset=0.5$ $d=10$ $V_0=16.67$ $V_1=22.22$ $DL=20$	2.9508
场景 6 直行遇 右侧相 邻车道 快速车 辆	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶，测试车辆左侧车道线为实线，右侧车道线为虚线，车道宽度为 X_0 。测试车辆右侧相邻车道放置以速度 V_2 行驶的目标车辆 TV_1 ，目标车辆 TV_1 左侧边界与虚线车道线横向距离为 $offset$ 。目标车辆 TV_1 与测试车辆初始纵向距离为 d 。	$offset=0.5$ $d=10$ $V_0=22.22$ $V_1=27.78$ $DL=20$	3.85
场景 7 直行遇 右侧相 邻车道 慢速车 辆	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶，测试车辆左侧车道线为实线，右侧车道线为虚线，车道宽度为 X_0 。测试车辆右侧相邻车道放置以速度 V_2 行驶的目标车辆 TV_1 ，目标车辆 TV_1 左侧边界与虚线车道线横向距离为 $offset$ 。目标车辆 TV_1 与测试车辆初始纵向距离为 d 。	$offset=0.5$ $d=10$ $V_0=22.22$ $V_1=16.67$ $DL=20$	3.85
场景 8 顺时针 弯道行 驶遇对 向车道 行驶车 辆	测试车辆以目标速度 V_1 在半径 R 的弯道上顺时针方向行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 对向行驶的目标车辆 TV_1 ，目标车辆 TV_1 左侧边界与虚线车道线横向距离为 $offset$ 。目标车辆 TV_1 与测试车辆初始纵向距离为 d 。注： V_{Tst} 为测试车辆当前车速。	$offset=0.5$ $d=10$ $V_0=22.22$ $V_1=-22.22$ $DL=27.664$ $\rho_{control} =$ 0.225	5.1608
场景 9 逆时针 弯道行 驶遇对 向车道 行驶车 辆	测试车辆以目标速度 V_1 在半径 R 的弯道上逆时针方向行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 对向行驶的目标车辆 TV_1 ，目标车辆 TV_1 左侧边界与虚线车道线横向距离为 $offset$ 。目标车辆 TV_1 与测试车辆初始纵向距离为 d 。注： V_{Tst} 为测试车辆当前车速。	$offset=0.5$ $d=10$ $V_0=22.22$ $V_1=-22.22$ $DL=27.664$ $\rho_{control} =$ 0.225	5.1608
场景 10 目标车 辆切入	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。相邻车道前方放置以速度 V_2 沿车道中心线行驶的目标车辆， $V_2 < V_1$ 。测试车辆与目标车辆之间的碰撞时间为 TTC 时，目标车辆保持速度不变，以变道周期 t 向本车道变道，目标车辆完成变道后，继续沿本车道中心线行驶。	$d=5$ $V_0=22.22$ $V_1=21.22$ $DL=5.556$	0.9205
场景 11 行人横 穿	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。本车道左/右侧放置等待穿行本车道行人，行人与车道中心线之间的距离为 D 。测试车辆与行人之间的纵向距离为 d 时，行人以速度 V_2 从测试车辆左/右侧穿行本车道。	$d=5$ $V_0=16.67$ $V_1=0$ $V_{1L}=0.42$ $invTTC=$ 3.3340 $dV=17.09$ $DL=20$	14.5569
场景 12 骑行者 横穿	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。本车道左/右侧放置等待穿行本车道骑行者，骑行者与车道中心线之间的距离为 D 。测试车辆与骑	$d=5$ $V_0=16.67$ $V_1=0$ $V_{1L}=1.67$ $invTTC=$	14.7863

[0377]

	行者之间的纵向距离为 d 时, 骑行者以速度 V_2 从测试车辆左/右侧穿行本车道。	3.3340 $dV=18.34$ $DL=10$	
场景 13 跟随起步	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶, 测试车辆右侧为实线车道线, 左侧为连续车辆避免测试车辆换道, 或者测试车辆两侧均为实线车道线。测试车辆前方放置静止目标车辆, 测试车辆以稳定速度 V_1 接近目标车辆, 测试车辆在目标车辆后方停止 10 s 后, 目标车辆以加速度 a_1 加速到车速 V_2 。	$d=5$ $V_0=0$ $V_1=0$ $invTTC=0$ $dV=0$ $DL=5.5556$	0.0694
场景 14 跟随行驶	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶, 测试车辆右侧为实线车道线, 左侧为连续车辆避免测试车辆换道, 或者测试车辆两侧均为实线车道线。测试车辆前方放置以速度 V_2 沿车道中心线行驶的目标车辆, $V_2 < V_1$, 测试车辆以稳定速度 V_1 接近目标车辆。	$d=5$ $V_0=22.22$ $V_1=16.67$ $invTTC=1.11$ $dV=5.55$ $DL=5.5556$	4.7930
场景 15 跟随停止	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶, 测试车辆右侧为实线车道线, 左侧为连续车辆避免测试车辆换道, 或者测试车辆两侧均为实线车道线。测试车辆前方放置以速度 V_2 沿车道中心线行驶的目标车辆, 测试车辆稳定跟随行驶时, 目标车辆以减速度 a 进行制动。	$d=5$ $V_0=22.22$ $V_1=11.11$ $invTTC=2.222$ $dV=11.11$ $DL=5.5556$	9.5251
场景 16 坡路跟随行驶	测试车辆以目标速度 V_1 在坡度为 i 的上坡路段行驶, 测试车辆右侧为实线车道线, 左侧为连续车辆避免测试车辆换道, 或者测试车辆两侧均为实线车道线。测试车辆前方放置以速度 V_2 沿车道中心线行驶的目标车辆, $V_2 < V_1$ 。测试车辆以稳定速度 V_1 接近目标车辆。	$d=5$ $V_0=22.22$ $V_1=16.67$ $invTTC=1.11$ $dV=5.55$ $DL=5.5556$	17.393
场景 17 跟随行驶过程中前车紧急制动	测试车辆以目标速度 V_1 在直线道路上行驶, 测试车辆右侧为实线车道线, 左侧为连续车辆避免测试车辆换道, 或者测试车辆两侧均为实线车道线。测试车辆前方放置以速度 V_2 沿车道中心线行驶的目标车辆, 测试车辆稳定跟随行驶时, 目标车辆以减速度 a 进行制动。	$d=5$ $V_0=22.22$ $V_1=0$ $invTTC=4.444$ $dV=22.22$ $DL=5.5556$	18.9808
场景 18 路口右转弯遇左侧垂直车道直行车辆	测试车辆以目标车速 V_1 接近十字路口, 测试车辆左侧车道线为虚线, 右侧车道线为实线, 车道宽度为 X_0 。测试车辆左侧垂直车道上放置以车速 V_2 进行直行的目标车辆, 测试车辆右转通过十字路口过程中, 测试车辆距离碰撞点所需时间与目标车辆距离碰撞点所需时间相同 $TTI_1=TTI_2$ 。	$d=10$ $V_0=22.22$ $V_1=22.22$ $invTTC=2.222$ $dV=0$ $DL=7.6844$ $\rho_{control}=1$	25.2961
场景 19 路口左转弯遇对向车道直行车辆	测试车辆以目标车速 V_1 接近十字路口, 测试车辆左侧车道线为实线, 右侧车道线为虚线, 车道宽度为 X_0 。对向车道上放置以车速 V_2 进行直行的目标车辆, 测试车辆左转通过十字路口过程中, 测试车辆距离碰撞点所需时间与目标车辆距离碰撞点所需时间相同 $TTI_1=TTI_2$ 。	$d=10$ $V_0=22.22$ $V_1=22.22$ $invTTC=2.222$ $dV=44.44$ $DL=7.6844$ $\rho_{control}=0.33$	25.2961
场景 20 路口直行遇对向车道左转弯	测试车辆以目标车速 V_1 接近十字路口, 测试车辆左侧车道线为实线, 右侧车道线为虚线, 车道宽度为 X_0 。对向车道上放置以车速 V_2 进行左转弯的目标车辆, 测试车辆直行通过十字路口过程中, 测试车辆距离碰撞点所需时间与目标车辆距离碰撞点所需时间相同	$d=10$ $V_0=22.22$ $V_1=22.22$ $invTTC=2.222$ $dV=44.44$	19.0017

[0378]

辆	$TTI_1=TTI_2$ 。	DL=7.6844	
场景 21 路口直行遇右侧垂直车道右转车辆	测试车辆以目标车速 V_1 接近十字路口，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。测试车辆右侧垂直车道上放置以车速 V_2 进行右转的目标车辆，测试车辆直行通过十字路口过程中，测试车辆距离碰撞点所需时间与目标车辆距离碰撞点所需时间相同 $TTI_1=TTI_2$ 。	d=10 V0=22.22 V1=22.22 invTTC=2.222 dV=0 DL=7.6844	6.4017
场景 22 直行变道遇后方目标车辆	测试车辆以目标速度 V_1 在两车道直线道路上行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。测试车辆前方放置以速度 V_2 沿车道中心线行驶的目标车辆 TV_1 ，测试车辆与目标车辆 TV_1 之间纵向距离为 D 。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_3 沿车道中心线行驶的目标车辆 TV_2 ， $V_3>V_2$ ，目标车辆 TV_1 与目标车辆 TV_2 之间纵向距离为 d 。	d1=5 d2=5 V0=22.22 V1=16.67 V2=27.78 invTLC=1.112 dV=5.556 DL1=5.5556 DL2=5.5556	4.8708
场景 23 向左转车道变道通过路口遇后方目标车辆	测试车辆在直行车道以目标车速 V_1 接近十字路口，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为虚线，车道宽度为 X_0 。测试车辆与停止线之间纵向距离为 D ，测试车辆左转通过路口。测试车辆左侧相邻车道放置以速度 V_2 沿车道中心线行驶的目标车辆，目标车辆与停止线之间纵向距离为 d 。	d1=10 d2=5 V0=22.22 V1=0 V2=27.78 invTLC=2.222 dV=22.22 DL=5.5556	17.3943
场景 24 起步换道遇后方目标车辆	接驳点设置在车道宽 X_1 的车道内，测试车辆驶入接驳区域后静止，测试车辆前方距离 D 处放置目标车辆 TV_1 ，测试车辆左侧目标车道内放置以速度 V_2 行驶的目标车辆 TV_2 ，目标车道宽 X_0 ，测试车辆与目标车辆 TV_2 的初始纵向距离为 d ，触发测试车辆起步，观察测试车辆行为。	d1=3 d2=5 V0=0 V1=0 V2=11.11 invTLC=2.222 dV=11.11 DL1=5.5556 DL2=5.5556	12.7388
场景 25 直行遇本车道目标车辆	测试车辆以目标速度 V_1 在双车道直线道路上行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。测试车辆前方放置以速度 V_2 沿车道中心线行驶的目标车辆，测试车辆以稳定速度 V_1 接近目标车辆。	d1=5 V0=22.22 V1=16.67 invTLC=1.11 dV=5.55 DL=5.5556	4.7524
场景 26 变道进入主路	测试车辆以目标速度 V_1 在辅路上行驶，车道宽度为 X_0 ，测试车辆驶入主路。	d1=10 d2=5 V0=16.67 V1=0 V2=0 invTLC=3.334 dV=16.67 DL=0	20.482
场景 27 变道进入辅路	测试车辆以目标速度 V_1 在主路上行驶，车道宽度为 X_0 ，测试车辆驶入辅路。	d1=10 d2=5 V0=22.22 V1=0 V2=0 invTLC=4.444	28.35

[0379]

		dV= 22.22 DL=0	
场景 28 合流车 道处变 道	测试车辆以目标速度 V_1 在合流车道上行驶，测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。测试车辆以稳定速度 V_1 接近合流车道交汇处。	d1=10 V0=22.22 V1=0 invTLC= 4.444 dV= 22.22 DL=0	17.3249
场景 29 路口直 行遇本 车道车 辆	测试车辆在直行车道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆直行通过十字路口过程中，测试车辆本车道放置静止目标车辆，目标车辆与目标车道停止线之间的纵向距离为 d 。	d1=10 V0=22.22 V1=0 invTLC= 2.222 dV= 22.22 DL=5.5556	17.3943
场景 30 路口直 行遇行 驶路径 车辆	测试车辆在直行车道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆直行通过十字路口过程中，测试车辆路口行驶路径内放置静止目标车辆，目标车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 。	d1=17 V0=22.22 V1=0 invTLC= 1.3071 dV=22.22 DL=5.5556	12.8546
场景 31 路口直 行遇目 标车道 车辆	测试车辆在直行车道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆直行通过十字路口过程中，测试车辆目标车道放置静止目标车辆，目标车辆与目标车道停止线之间的纵向距离为 d 。	d1=35 V0=22.22 V1=0 invTLC= 0.6349 dV=22.22 DL=5.5556	9.5192
场景 32 路口左 转遇本 车道车 辆	测试车辆在左转车道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆左转通过十字路口过程中，测试车辆本车道放置静止目标车辆，目标车辆与目标车道停止线之间的纵向距离为 d 。	d1=10 V0=22.22 V1=0 invTLC= 0.6349 dV=22.22 DL=5.5556 $\rho_{\text{control}} = 0.33$	29.9943
场景 33 路口左 转遇行 驶路径 车辆	测试车辆在左转车道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆左转通过十字路口过程中，测试车辆路口行驶路径内放置静止目标车辆，目标车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 。	d1=17 V0=22.22 V1=0 invTLC= 1.3071 dV=22.22 DL=5.5556 $\rho_{\text{control}} = 0.33$	25.4546
场景 34 路口左 转遇目 标车道 车辆	测试车辆在左转车道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆左转通过十字路口过程中，测试车辆目标车道放置静止目标车辆，目标车辆与目标车道停止线之间的纵向距离为 d 。	d1=35 V0=22.22 V1=0 invTLC= 0.6349 dV=22.22 DL=5.5556 $\rho_{\text{control}} = 0.33$	22.1192
场景 35 路口右 转遇本	测试车辆在右转车道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆右转通过十字路口过程中，测试车辆本车道放置静止目标车辆，目标车辆与目标	d1=10 V0=22.22 V1=0	17.3943

[0380]

车道车辆	车道停止线之间的纵向距离为 d 。	invTLC=2.222 dV=22.22 DL=5.5556	
场景 36 路口右 转遇行 驶路径 车辆	测试车辆在右转弯道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆右转通过十字路口过程中，测试车辆路口行驶路径内放置静止目标车辆，目标车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 。	d1=17 V0=22.22 V1=0 invTLC=1.3071 dV=22.22 DL=5.5556	37.8694
场景 37 路口右 转遇目 标车道 车辆	测试车辆在直行车道以目标车速 V_1 接近十字路口，车道宽度为 X_0 。测试车辆右转通过十字路口过程中，测试车辆目标车道放置静止目标车辆，目标车辆与目标车道停止线之间的纵向距离为 d 。	d1=35 V0=22.22 V1=0 invTLC=0.6349 dV=22.22 DL=5.5556	37.8694
场景 38 直路行 驶	测试车辆以目标车速 V_1 在直线车道上行驶，道路限制速度设置为 $Speed\ limit$ 。测试车辆左侧车道线为实线，右侧车道线为虚线，车道宽度为 X_0 。	d=10 V0=22.22 V1=0 V2=11.11 dV=11.11 DL=20	6.08
场景 39 弯道行 驶	测试车辆以目标车速 V_1 在半径 R 的弯道上顺时针方向行驶，道路限制速度设置为 $Speed\ limit$ 。测试车辆左侧车道线为虚线，右侧车道线为实线，车道宽度为 X_0 。	d=10 V0=22.22 V1=0 V2=11.11 dV=11.11 DL=20 $\rho_{control} = 0.225$	7.052
场景 40 路口直 行遇绿 灯变黄 灯	测试车辆以目标车速 V_1 在直行/右转弯道上行驶，车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置单排机动车信号灯，测试车辆直行通过十字路口过程中，机动车信号灯状态默认为绿灯，测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时，机动车信号灯的状态设置为黄灯；经过黄灯时长 $Yellow_Light_Time$ 后，机动车信号灯的状态设置为红灯。	d1=20 d2=15 V0=5.56 TYL=3 invTHY=1.6747 DL=30	14.7342
场景 41 路口左 转遇绿 灯变黄 灯	测试车辆以目标车速 V_1 在左转弯道上行驶，车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置双排信号灯，左侧为方向指示信号灯，右侧为机动车信号灯。测试车辆左转过十字路口过程中，左转方向指示信号灯的状态默认为绿灯，测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时，左转方向指示信号灯的状态设置为黄灯，右侧机动车信号灯的状态设置为 $Right_Signal_Status$ ；经过黄灯时长 $Yellow_Light_Time$ 后，左转方向指示信号灯的状态设置为红灯。	d1=20 d2=15 V01=5.56 V02=0 TYL=3 DL=30 invTHY=1.6747 $\rho_{control} = 0\ or\ 0.33$	18.3084
场景 42 信号灯 路口直 行	测试车辆以目标车速 V_1 在直行/右转弯道上行驶，车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置单排机动车信号灯，测试车辆直行通过十字路口过程中，机动车信号灯状态默认为红灯，测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时，机动车信号灯的状态设置为绿灯。	d1=5 d2=20 V0=2.78 DL=40	2.9504
场景 43 信号灯	测试车辆以目标车速 V_1 在左转弯道上行驶，车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置双排信号灯，左侧为方	d1=5 d2=20	7.2504

[0381]

路口左 转	向指示信号灯, 右侧为机动车信号灯。测试车辆左转通过十字路口过程中, 左转方向指示信号灯状态默认为红灯, 测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时, 左转方向指示信号灯的状态设置为绿灯, 右侧机动车信号灯的状态设置为 <i>Right_Signal_Status</i> 。	V0=2.78 DL1=40 DL2=40 $\rho_{control} = 0.33$	
场景 44 左转代 转区左 转	测试车辆以目标车速 V_1 在左转车道上行驶, 左转车道处设置左转待转区, 车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置双排信号灯, 左侧为方向指示信号灯, 右侧为机动车信号灯。测试车辆左转通过十字路口过程中, 左转方向指示信号灯状态默认为红灯, 直行信号灯状态默认为红灯, 测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时, 直行信号灯状态设置为绿灯。	d0=5 d1=10 d2=20 V0=2.78 DL1=40 DL2=40 invTHW= 0.278 $\rho_{control} = 0.33$	26.6
场景 45 方向指 示信号 灯路口 右转	测试车辆以目标车速 V_1 在右转车道上行驶, 车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置双排信号灯, 左侧为机动车信号灯, 右侧为方向指示信号灯。测试车辆右转通过十字路口过程中, 右转方向指示信号灯的状态默认为黄灯, 测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时, 右转方向指示信号灯的状态设置为红灯, 左侧机动车信号灯的状态设置为 <i>Left_Signal_Status</i> ; 经过红灯时长 <i>Red_Light_Time</i> 后, 右转方向指示信号灯的状态设置为绿灯。	d1=5 d2=20 V01=2.78 V02=0 DL=40 $\rho_{control} =$ 0 or 0.33	14.72
场景 46 信号灯 路口跨 停止线 掉头	测试车辆以目标车速 V_1 在左转车道上行驶, 车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置信号灯, 测试车辆跨越停止线掉头通过十字路口过程中, 信号灯状态默认为红灯, 测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时, 信号灯的状态设置为绿灯。	d1=5 d2=20 V0=2.78 DL=40 $\rho_{control} =$ 0.6667	9.0504
场景 47 信号灯 路口未 跨停止 线掉头	测试车辆以目标车速 V_1 在左转车道上行驶, 车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置信号灯, 测试车辆未跨越停止线掉头通过十字路口过程中, 信号灯状态默认为红灯, 测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时, 信号灯的状态设置为绿灯。	d1=5 d2=20 V0=2.78 DL=40 $\rho_{control} =$ 0.6667	9.0504
场景 48 黄灯闪 烁路口 直行	测试车辆以目标车速 V_1 在直行/右转车道上行驶, 车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置单排机动车信号灯, 测试车辆直行通过十字路口过程中, 机动车信号灯状态默认为绿灯, 测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时, 机动车信号灯的状态设置为闪烁的黄灯。	d1=5 d2=20 V0= 22.22 DL=40 TYL=0	5
场景 49 人行横 道信号 灯	测试车辆以目标车速 V_1 在直线车道上行驶, 车道宽度为 X_0 。测试车辆前方人行横道位置放置人行横道信号灯, 测试车辆直行通过人行横道过程中, 人行横道信号灯状态默认为红灯, 测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时, 人行横道信号灯的状态设置为绿灯。	d1=10 V0= 11.11 DL=20	2.8484
场景 50 临时信 号灯	测试车辆以目标车速 V_1 在直行/右转车道上行驶, 车道宽度为 X_0 。十字路口位置放置临时信号灯, 测试车辆直行通过十字路口过程中, 临时信号灯状态默认为黄灯, 测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时, 临时信号灯的状态设置为红灯; 经过红灯时长 <i>Red_Light_Time</i> 后, 临时信号灯的状态设置为绿灯。	d1=5 d2=12.5 V0= 11.11 DL=25	5.7313

[0382]	场景 51 铁路道 口信号 灯	测试车辆以目标车速 V_1 在直行车道上行驶，车道宽度为 X_0 ，前方为铁路道口。铁路道口位置放置道口信号灯，测试车辆直行通过铁路道口过程中，道口信号灯状态默认为黄灯，测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时，道口信号灯的状态设置为红灯；经过红灯时长 Red_Light_Time 后，道口信号灯的状态设置为黄灯。	$d1=10$ $d2=0$ $V01=15.56$ $V02=0$ $DL=20$ $invTHW=1.556$ $invTHY=0$	5.3684
	场景 52 潮汐车 道	测试车辆以目标车速 V_1 在直行车道上行驶，车道宽度为 X_0 ，路口前方为潮汐车道且路口位置放置车道信号灯。测试车辆直行通过路口过程中，车道信号灯状态默认为绿灯，测试车辆与本车道停止线之间的纵向距离为 d 时，车道信号灯的状态设置为红灯。	$d=10$ $V0=15.56$ $DL=20$ $invTHW=1.556$	5.3684

[0383] 以上详细描述了本发明的较佳具体实施例。应当理解，本领域的普通技术人员无需创造性劳动就可以根据本发明的构思作出诸多修改和变化。因此，凡本技术领域中技术人员依本发明的构思在现有技术的基础上通过逻辑分析、推理或者有限的实验可以得到的技术方案，皆应在由权利要求书所确定的保护范围内。

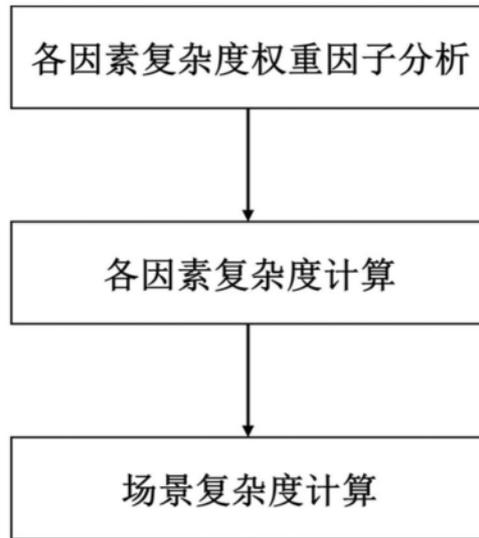


图1

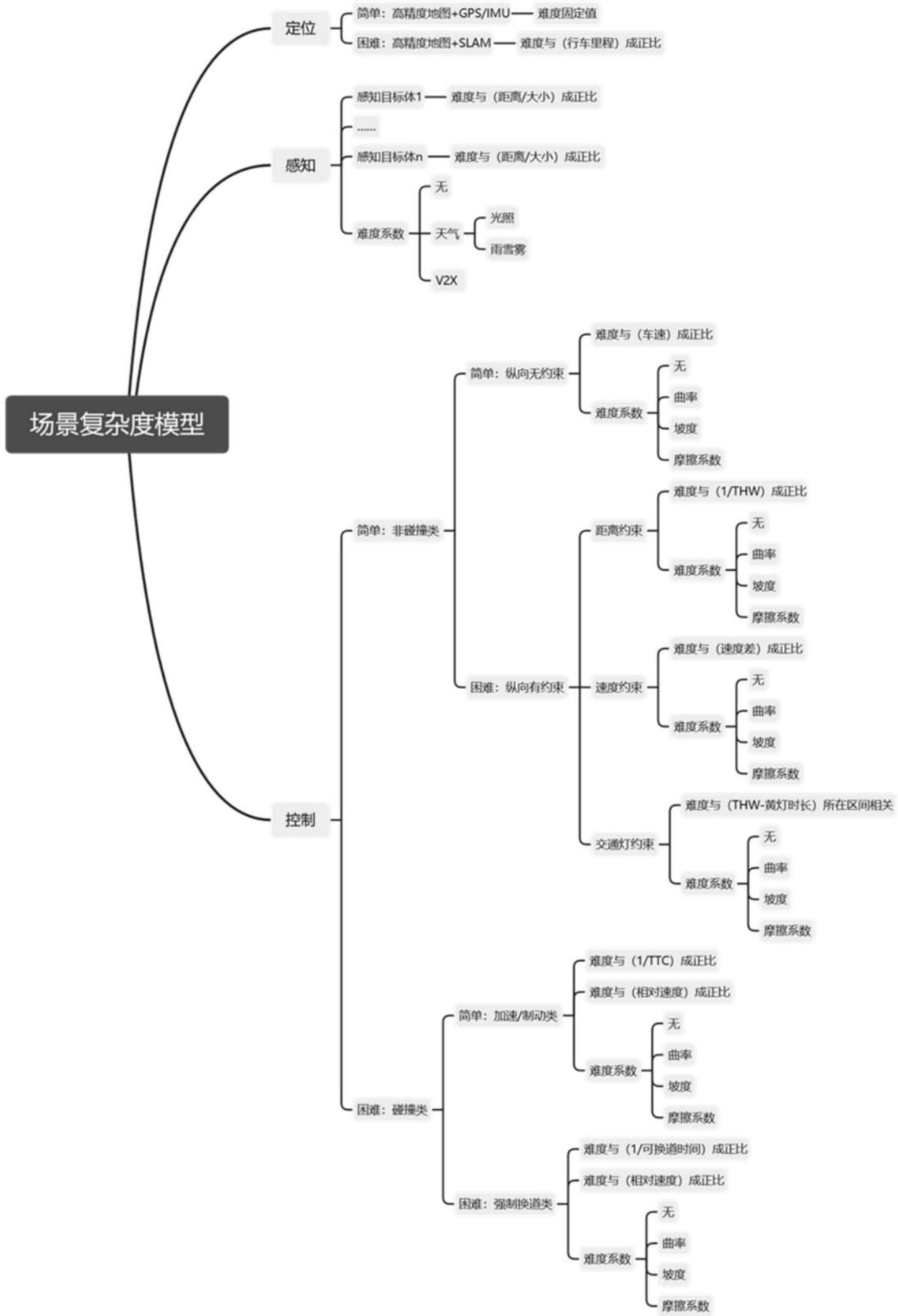


图2

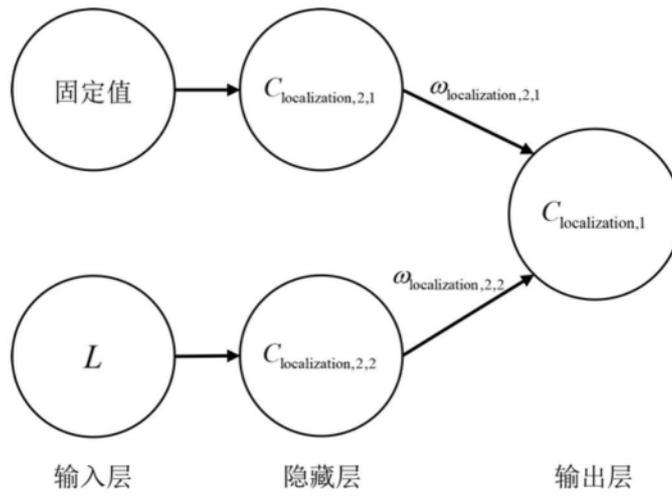


图3

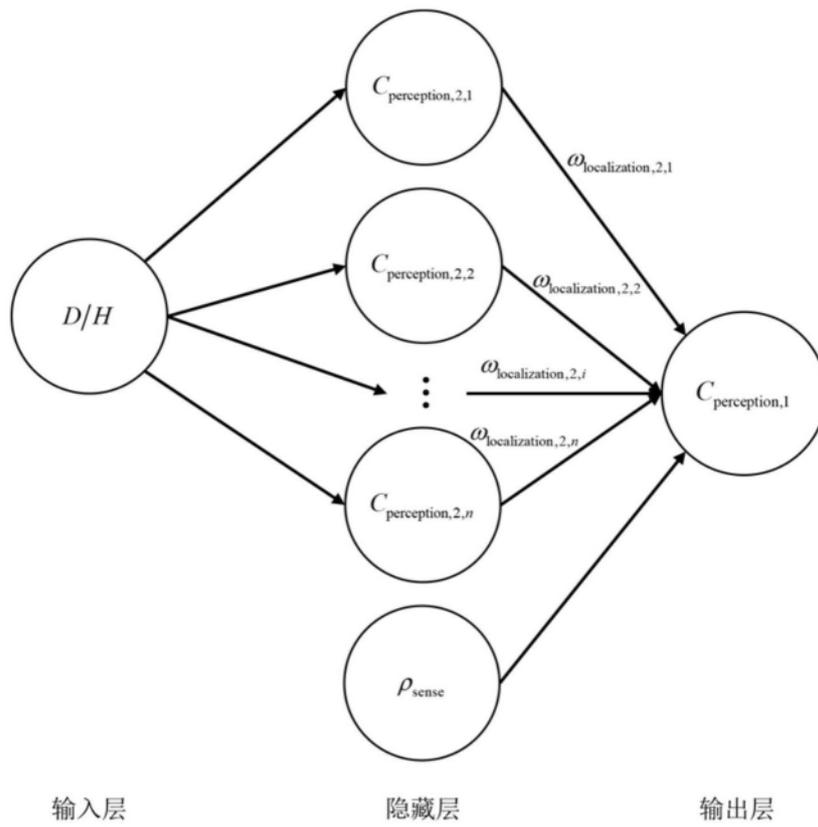


图4

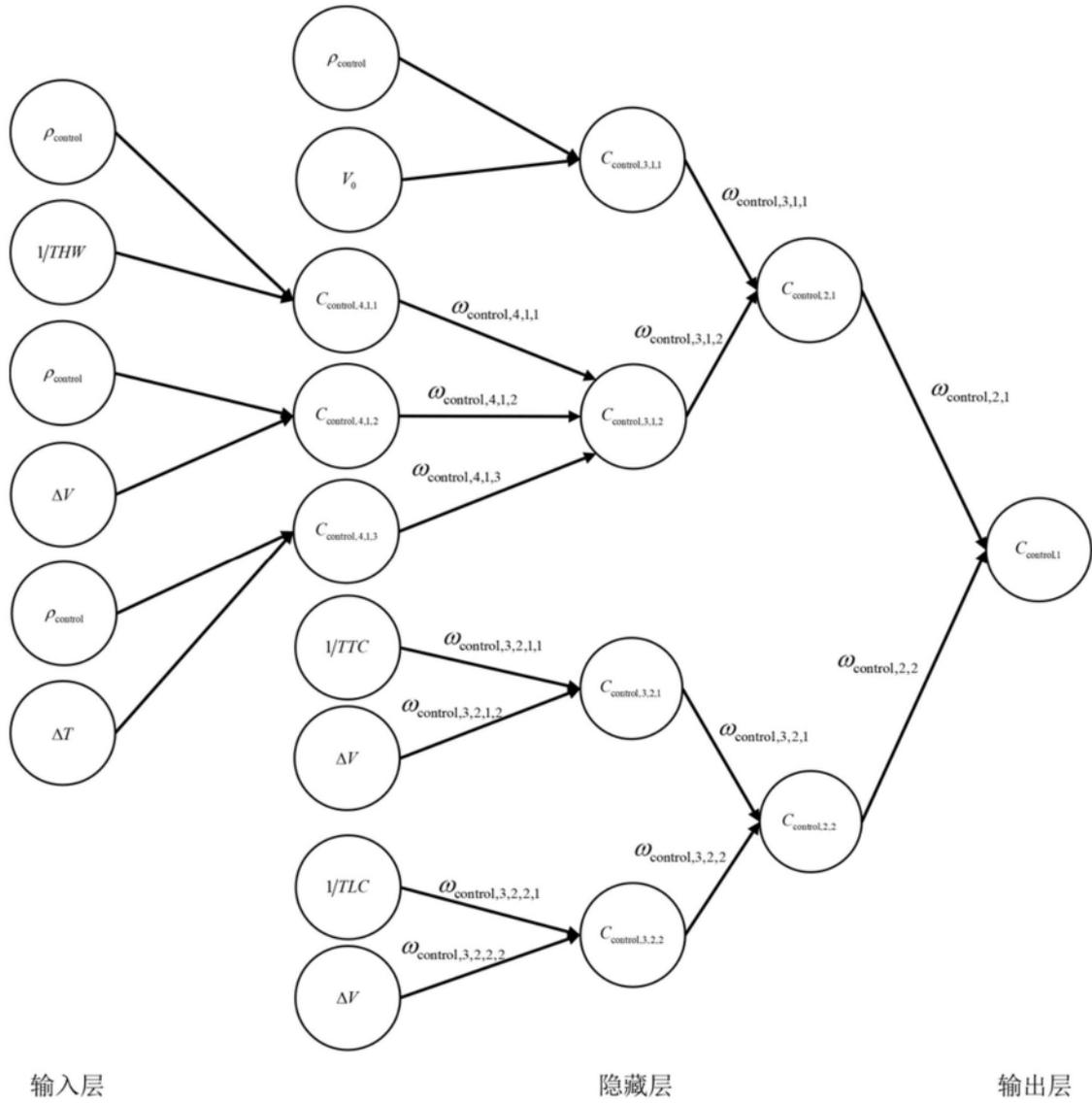


图5

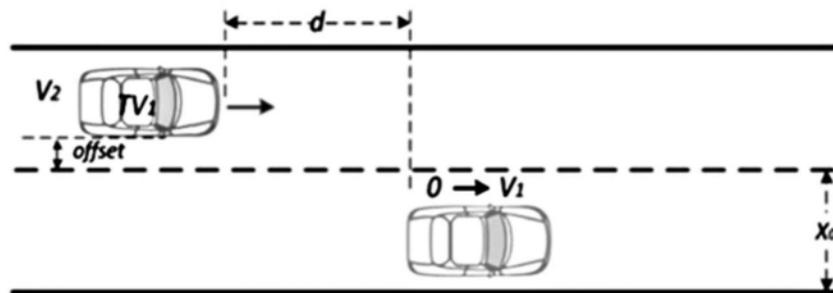
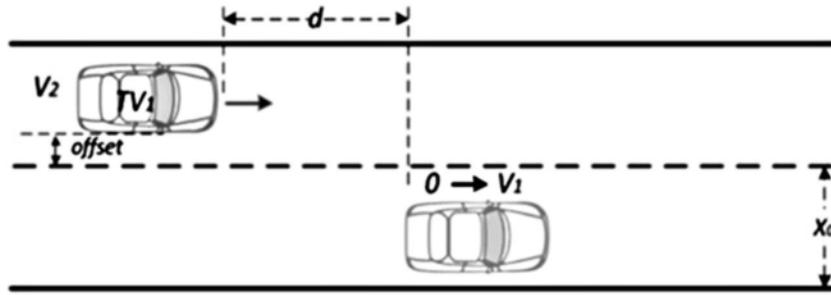
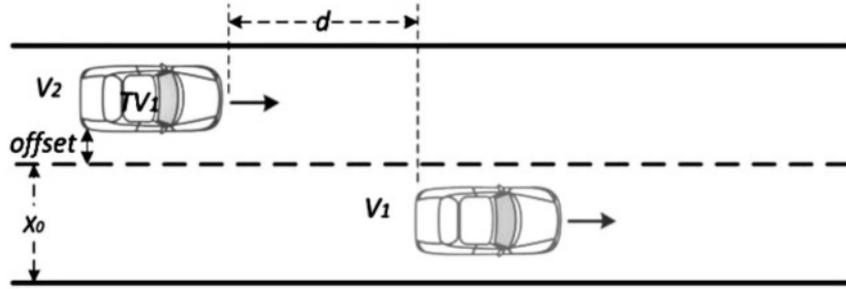


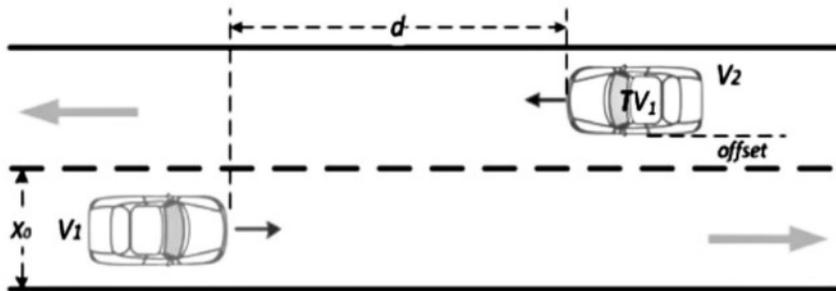
图6



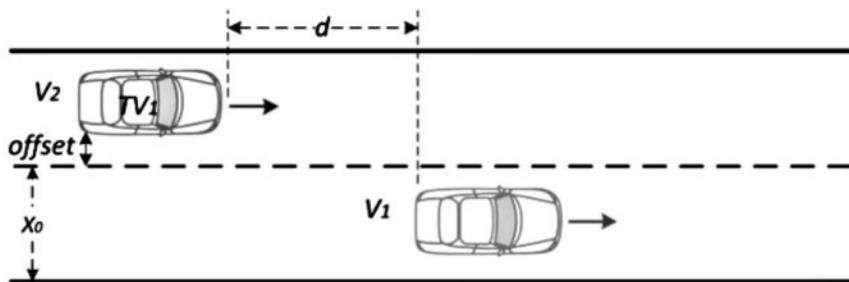
(1)



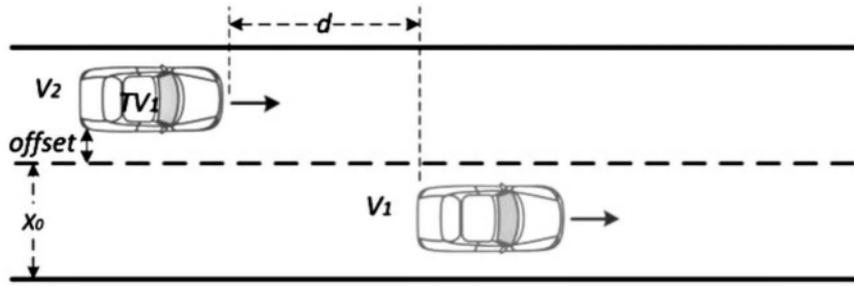
(2)



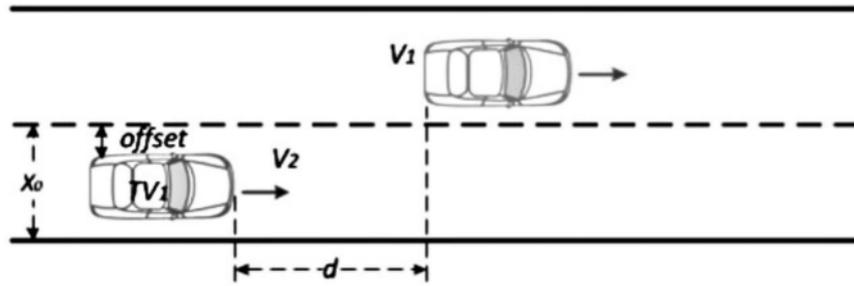
(3)



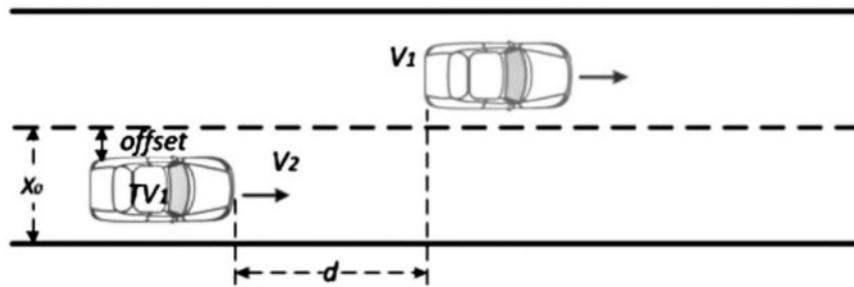
(4)



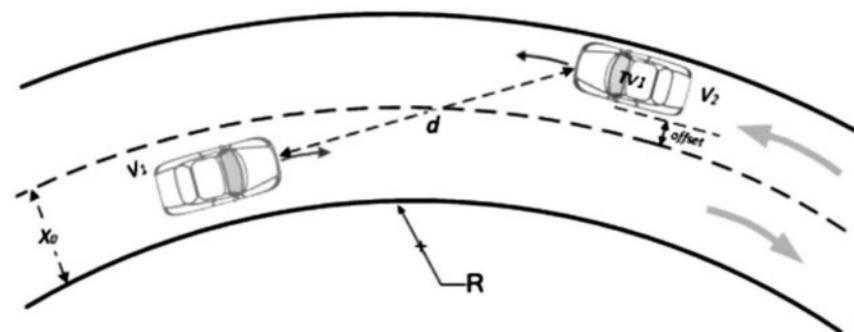
(5)



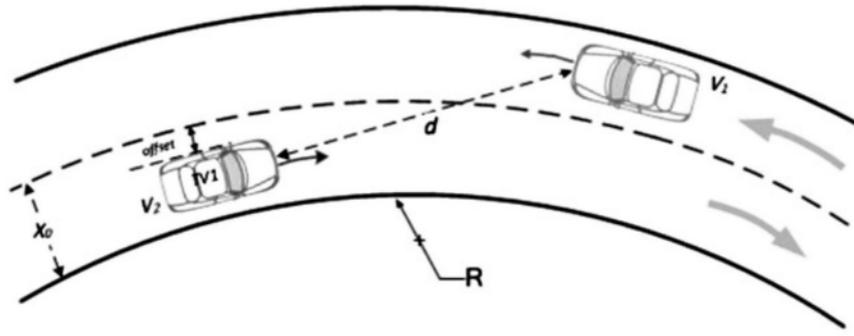
(6)



(7)

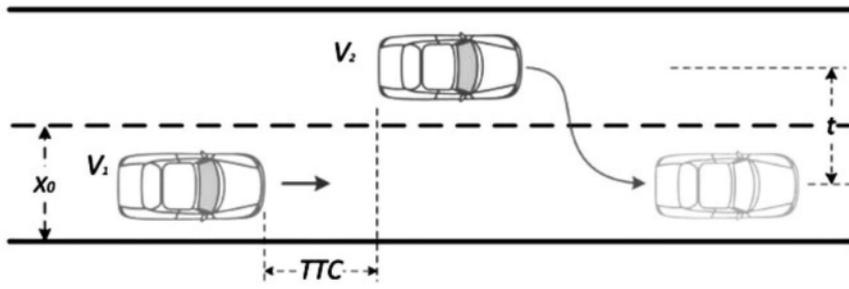


(8)

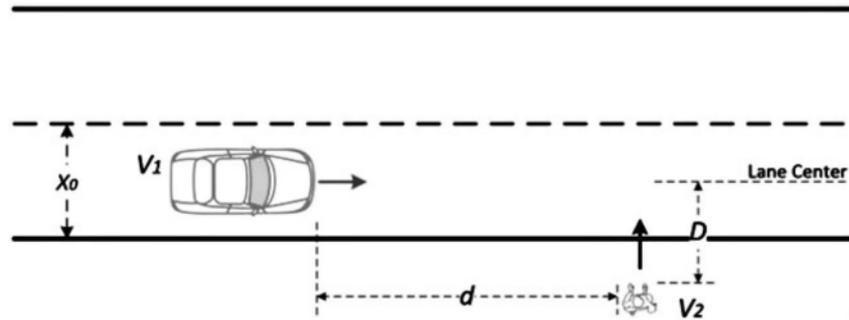


(9)

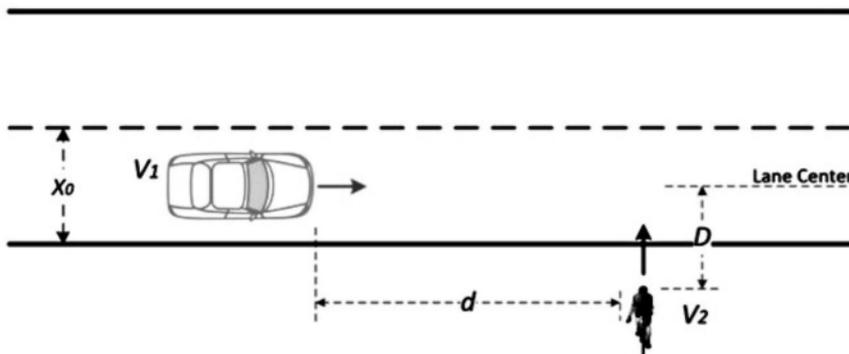
图7



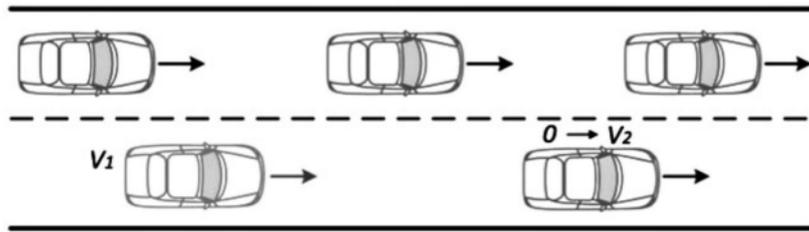
(10)



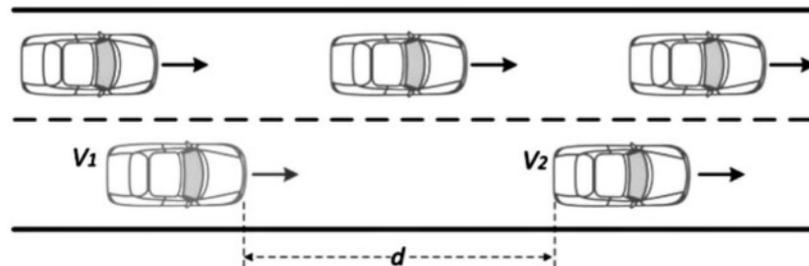
(11)



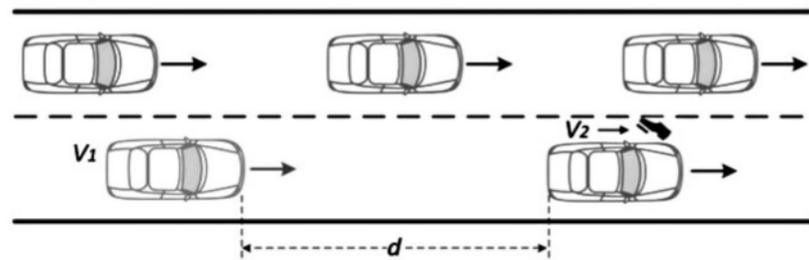
(12)



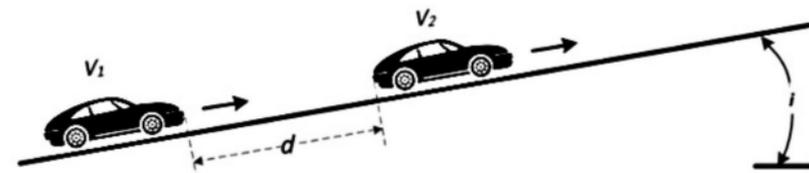
(13)



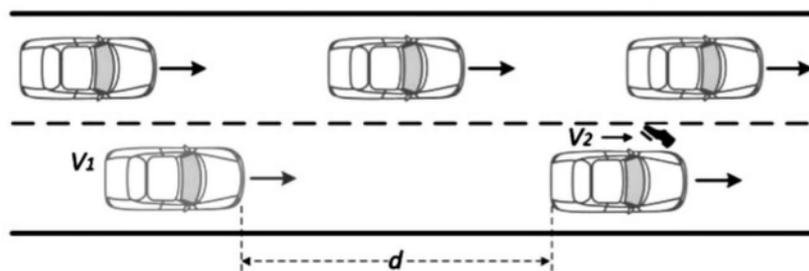
(14)



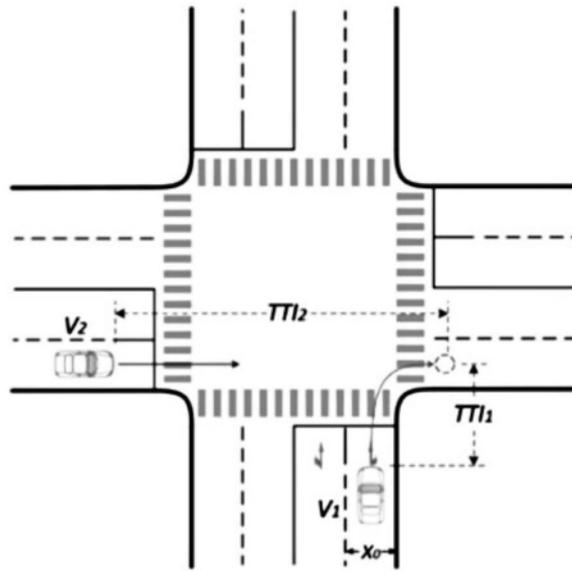
(15)



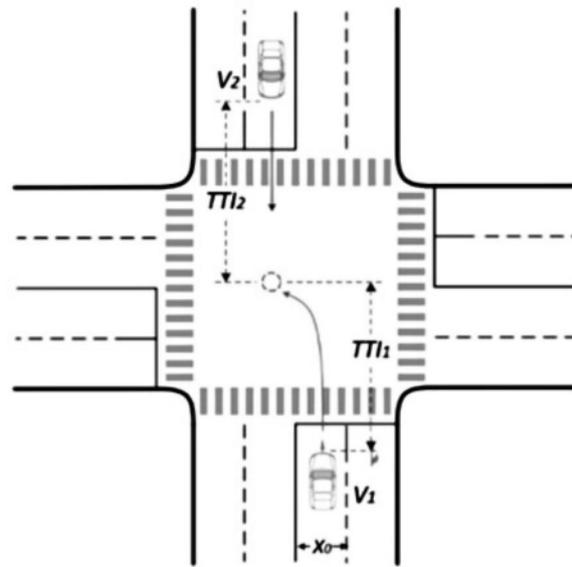
(16)



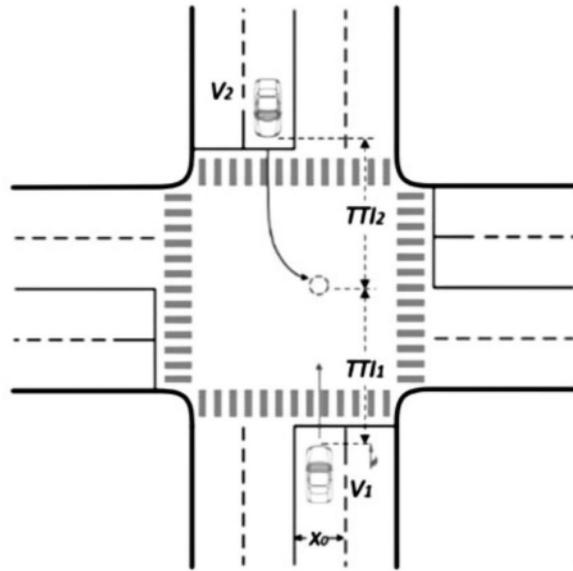
(17)



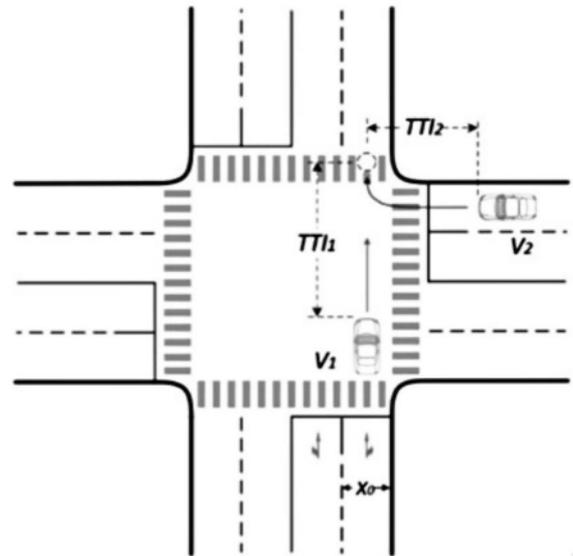
(18)



(19)

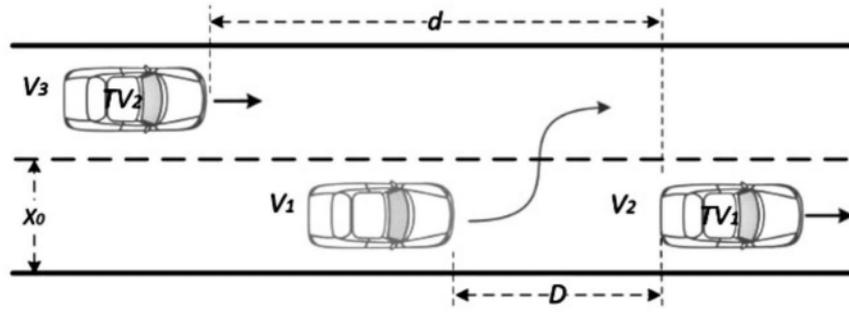


(20)

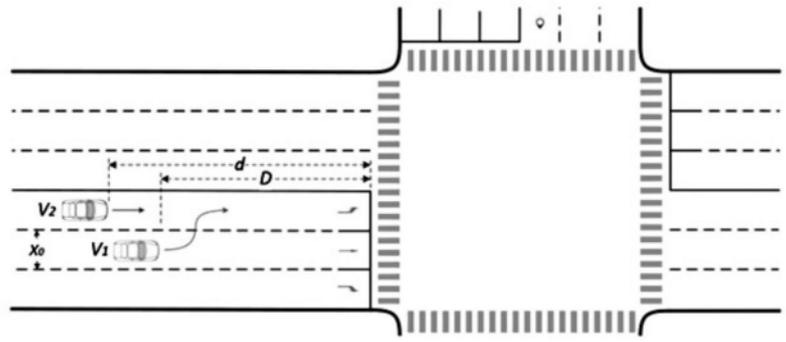


(21)

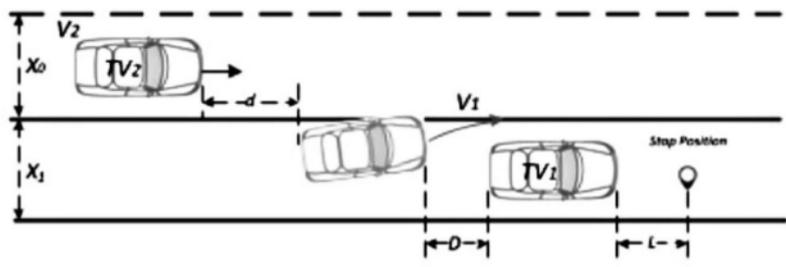
图8



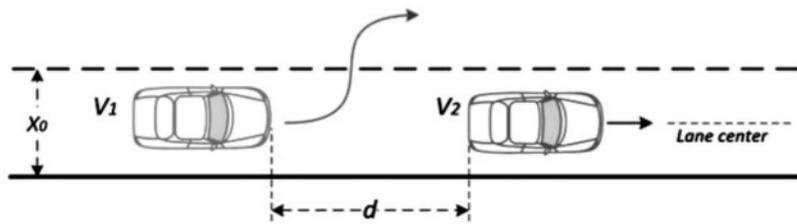
(22)



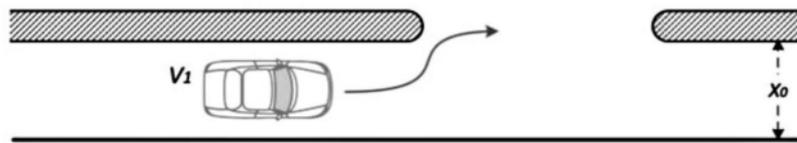
(23)



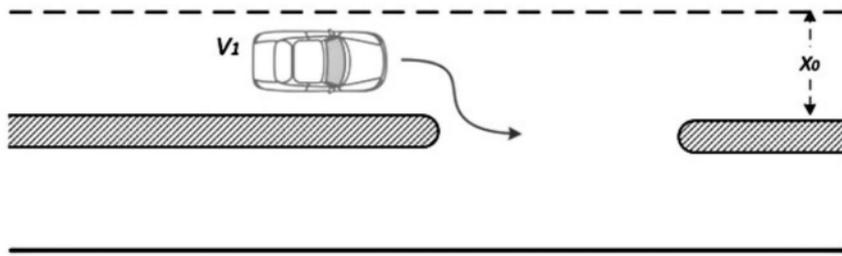
(24)



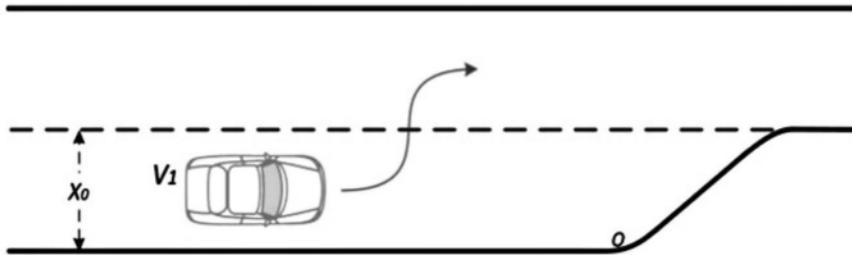
(25)



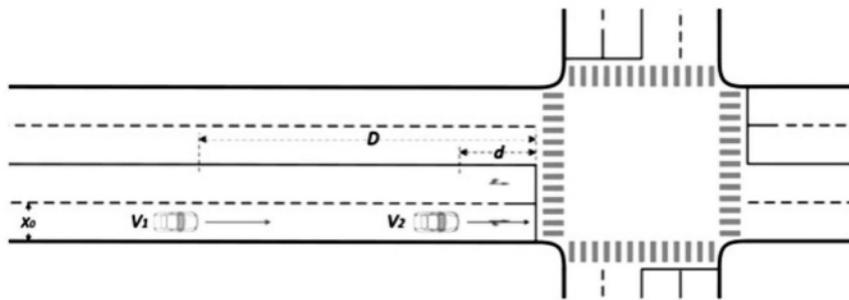
(26)



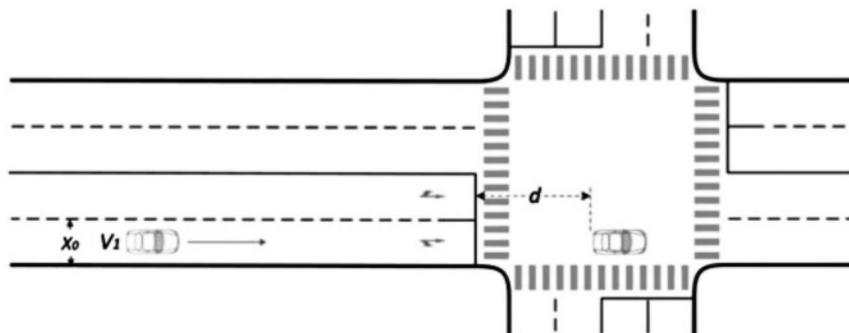
(27)



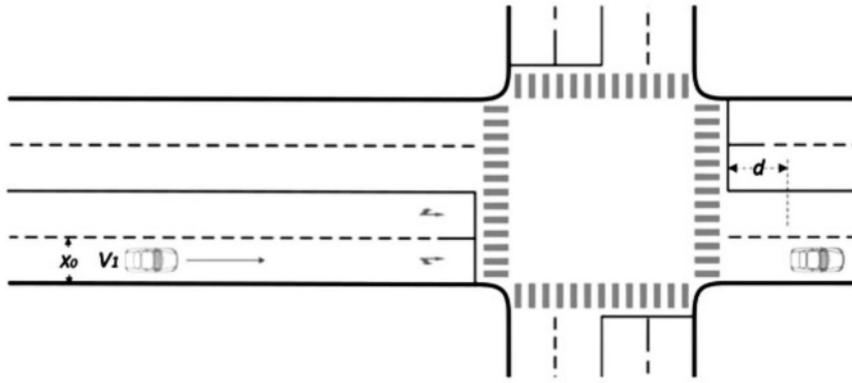
(28)



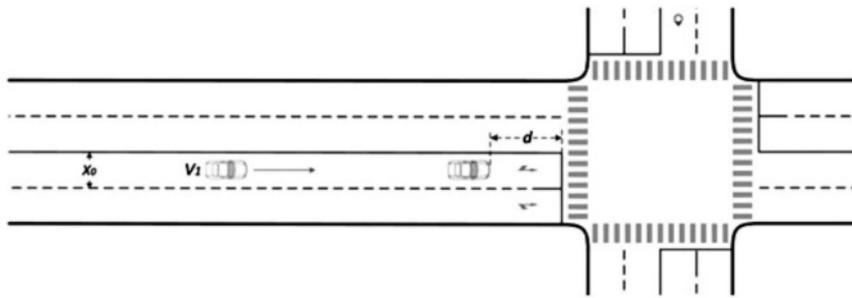
(29)



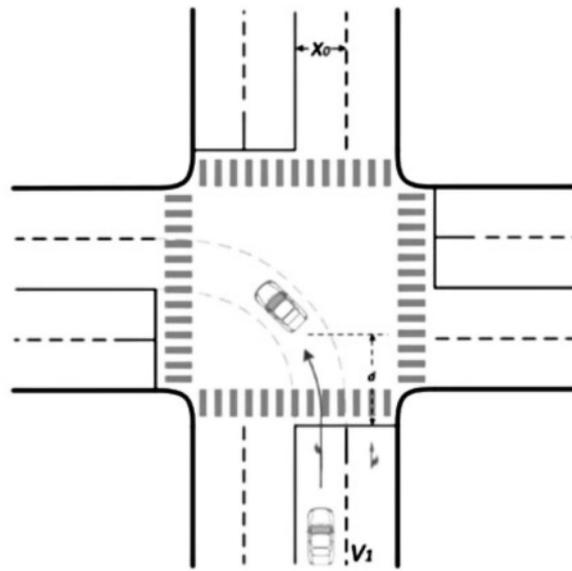
(30)



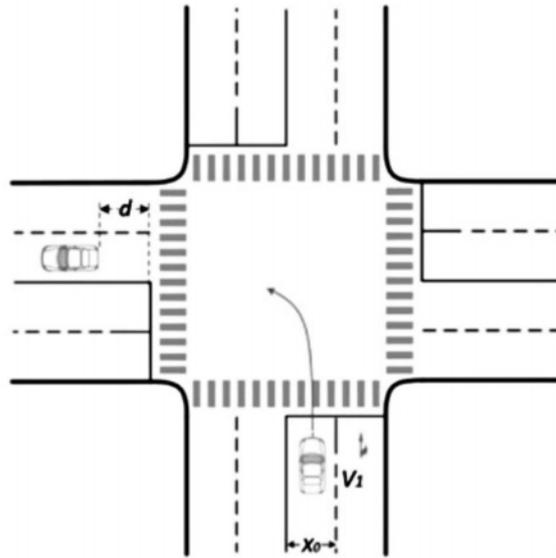
(31)



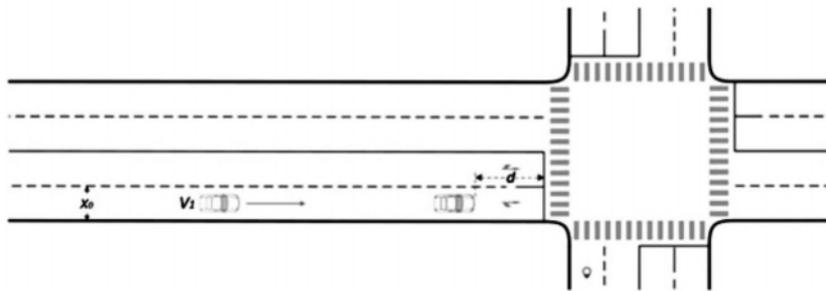
(32)



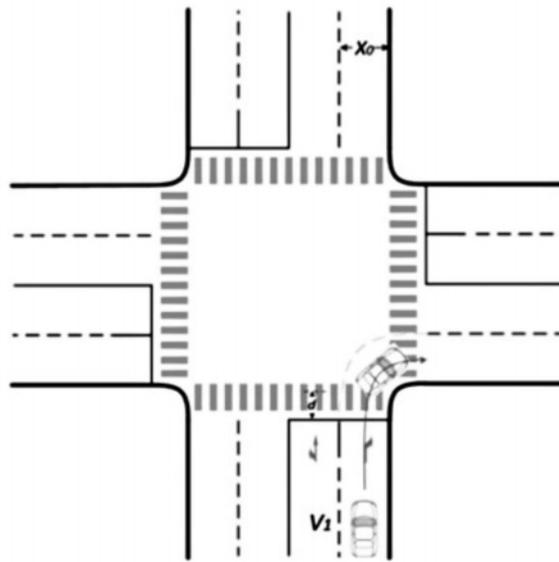
(33)



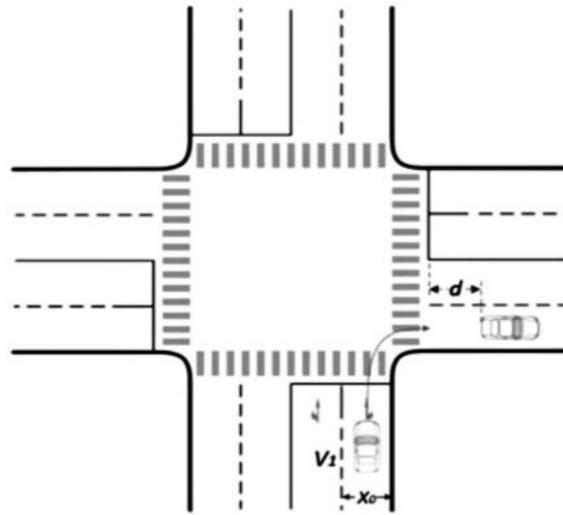
(34)



(35)

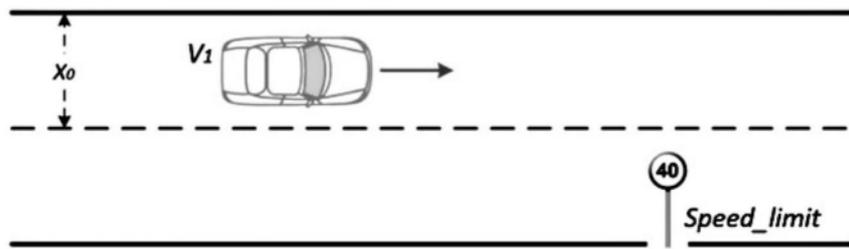


(36)

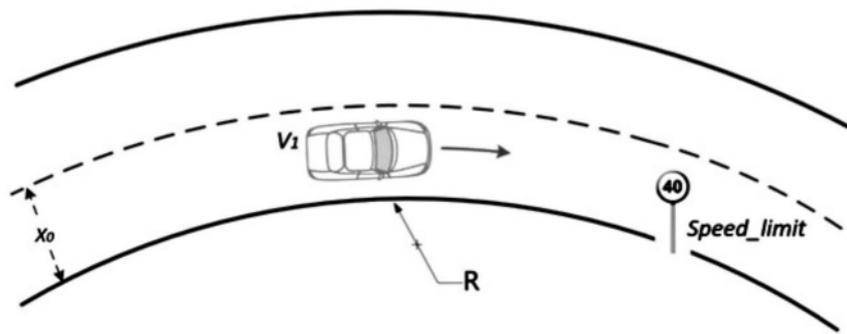


(37)

图9

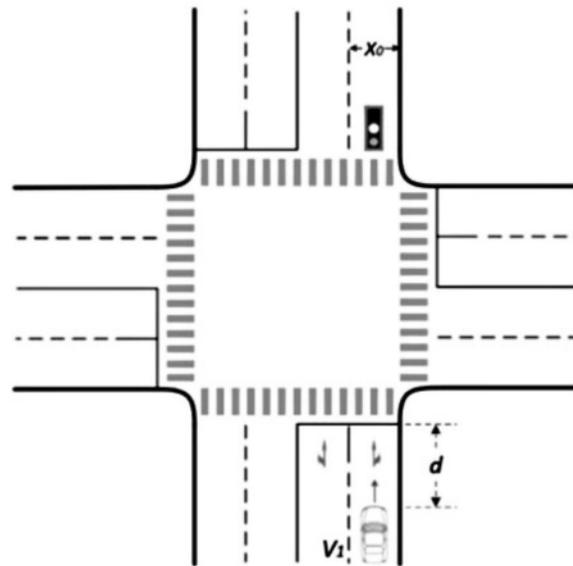


(38)

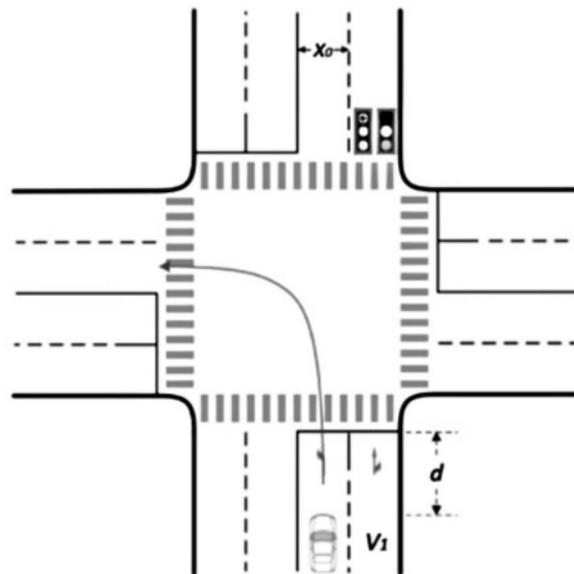


(39)

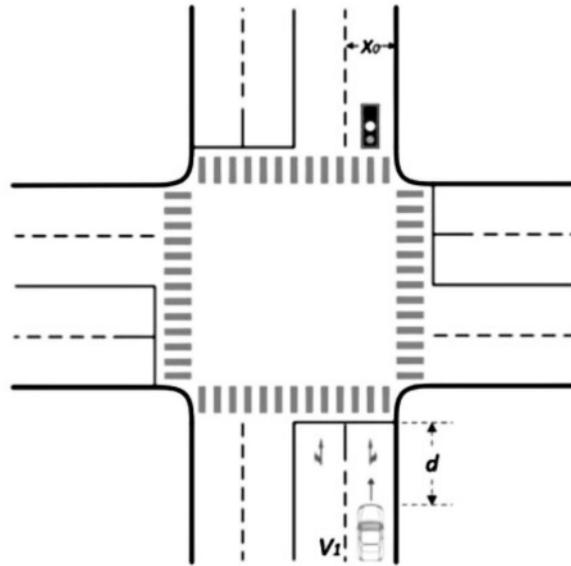
图10



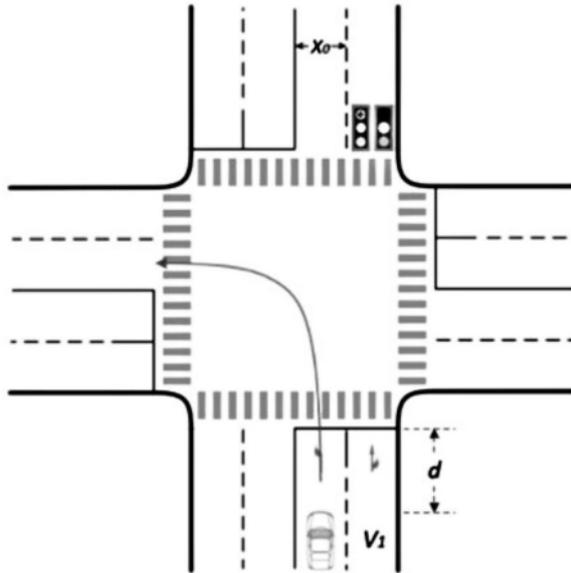
(40)



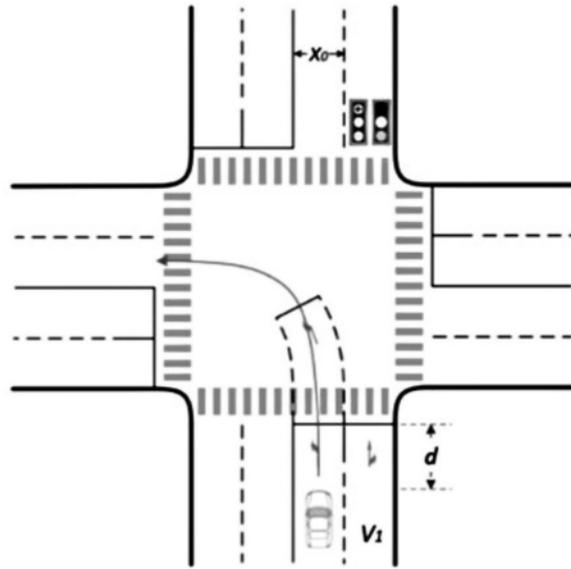
(41)



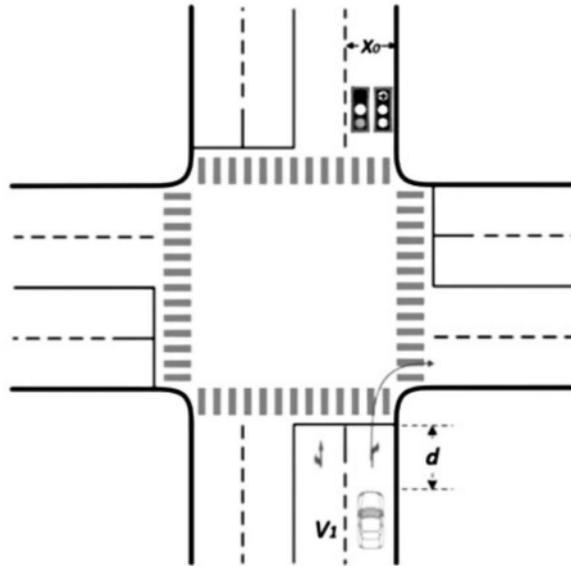
(42)



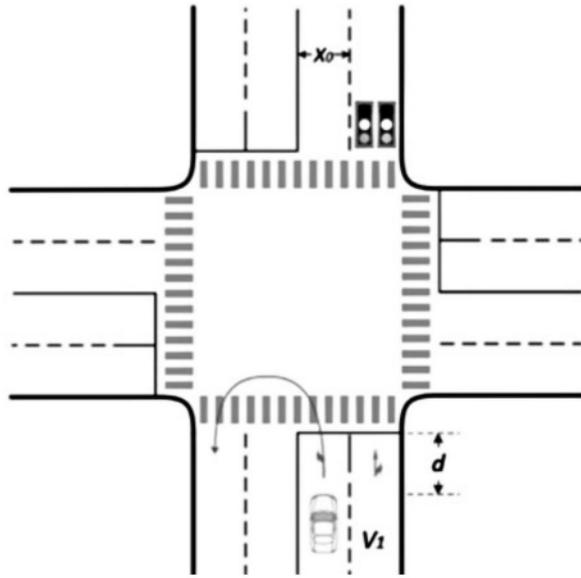
(43)



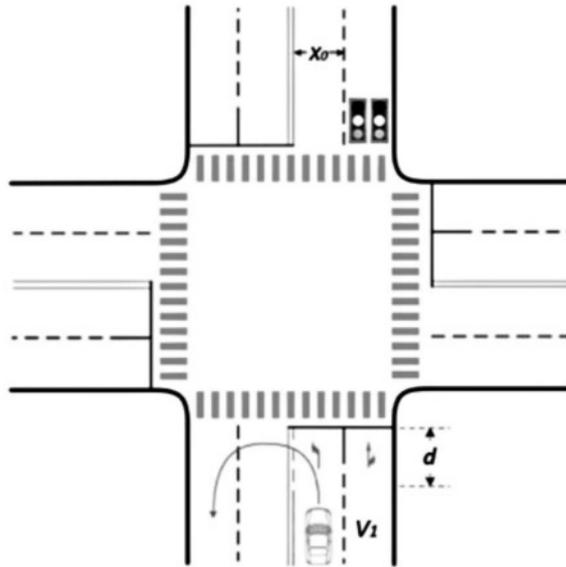
(44)



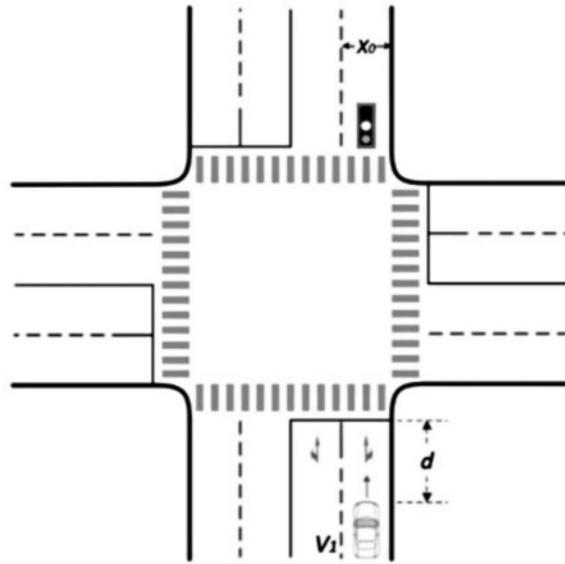
(45)



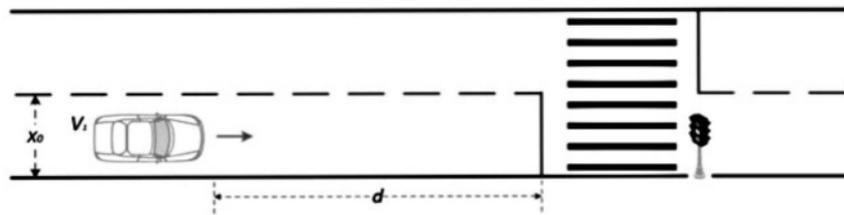
(46)



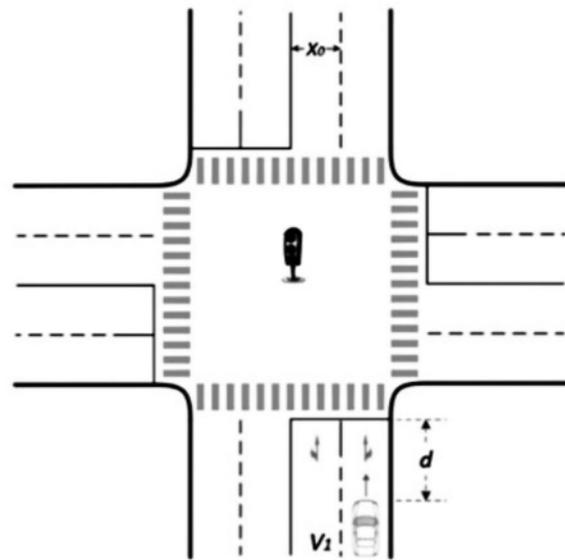
(47)



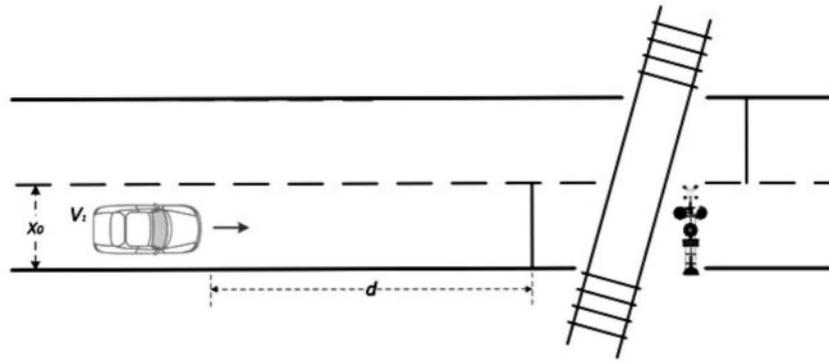
(48)



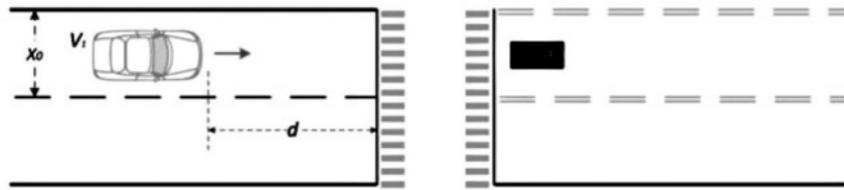
(49)



(50)



(51)



(52)

图11