

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2023 年 3 月 30 日 (30.03.2023)



(10) 国际公布号
WO 2023/045265 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 30/20 (2020.01) *G06Q 50/30* (2012.01)
G06Q 10/06 (2012.01) *G06F 111/08* (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/079109

(22) 国际申请日: 2022 年 3 月 3 日 (03.03.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202111131805.6 2021 年 9 月 26 日 (26.09.2021) CN

(71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。

(72) 发明人: 黄荷叶 (HUANG, Heye); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 王建强 (WANG,

Jianqiang); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 杨奕彬 (YANG, Yibin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 刘艺璵 (LIU, Yicong); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 崔明阳 (CUI, Mingyang); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 许庆 (XU, Qing); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 李克强 (LI, Keqiang); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

(74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区阜成路 73 号裕惠大厦 B 座 806, Beijing 100142 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,

(54) **Title:** DRIVER-VEHICLE-ROAD MICROSCOPIC TRAFFIC SYSTEM MODELING AND RISK IDENTIFICATION METHOD AND DEVICE

(54) 发明名称: 人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法及装置

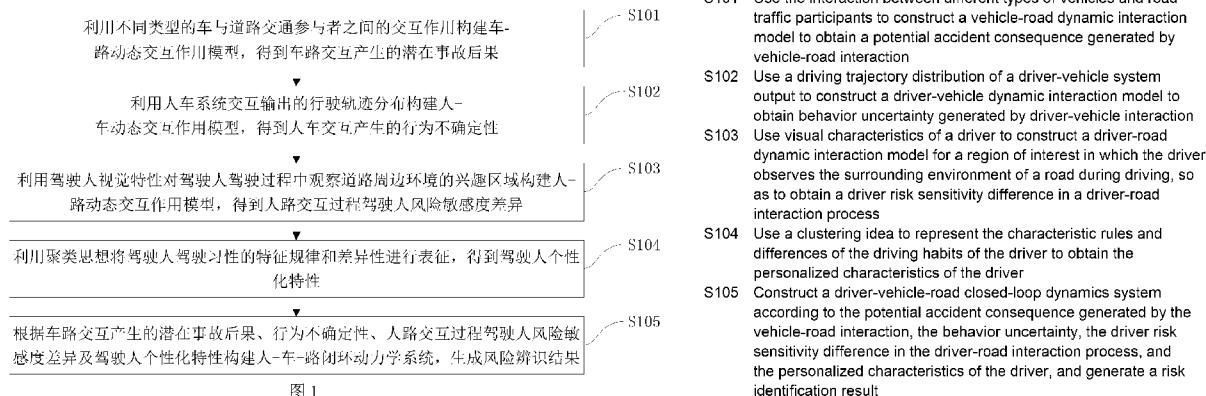


图 1

(57) **Abstract:** The present application discloses a driver-vehicle-road microscopic traffic system modeling and risk identification method and device. The method comprises: constructing a vehicle-road dynamic interaction model to obtain a potential accident consequence generated by vehicle-road interaction; constructing a driver-vehicle dynamic interaction model to obtain behavior uncertainty generated by driver-vehicle interaction; constructing a driver-road dynamic interaction model to obtain a driver risk sensitivity difference in a driver-road interaction process; using a clustering idea to represent the characteristic rules and differences of the driving habits of a driver to obtain the personalized characteristics of the driver; and constructing a driver-vehicle-road closed-loop dynamics system according to the potential accident consequence generated by the vehicle-road interaction, the behavior uncertainty, the driver risk sensitivity difference in the driver-road interaction process, and the personalized characteristics of the driver, and generating a risk identification result. Therefore, the effect of a driver factor, a vehicle motion state, and a road environment information interaction process on a system safety state can be represented, and system risk identification and graded early warning are realized.

(57) 摘要: 本申请公开了一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法及装置, 其中, 方法包括: 构

CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

一 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

建车-路动态交互作用模型, 得到车路交互产生的潜在事故后果; 构建人-车动态交互作用模型, 得到人车交互产生的行为不确定性; 构建人-路动态交互作用模型, 得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异; 利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征, 得到驾驶人个性化特性; 根据车路交互产生的潜在事故后果、行为不确定性、人路交互过程驾驶人风险敏感度差异及驾驶人个性化特性构建人-车-路闭环动力学系统, 生成风险辨识结果。由此, 可以表征驾驶人因素、车辆运动状态、道路环境信息交互过程对系统安全状态的影响, 实现系统风险辨识与分级预警。

人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法及装置

相关申请的交叉引用

- 5 本申请要求清华大学于 2021 年 09 月 26 日提交的、发明名称为“人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法及装置”的、中国专利申请号“202111131805.6”的优先权。

技术领域

- 10 本申请涉及自动驾驶技术领域，特别涉及一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法及装置。

背景技术

- 15 车辆行驶时，道路环境复杂多变，其安全状态受到较多因素影响，大体上可以分为人（生理状态、操纵特征、意图等）、车（运行工况）、路（天气、路况、交通流等）三个因素。由于驾驶人预瞄不足、反应延迟以及操控失误等不确定性因素，加之可能出现的车辆故障、周车行为意图难以预测以及道路环境恶化等，使得交通事故难以从根本上彻底消除。此外，驾驶人特性、周车意图和道路环境的不确定性随着人-车-路闭环系统非线性迭代不断传播放大，导致车辆动力学特性难以预测。因此，阐明人-车-路交互作用，准确表征各交通要素对系统的影响，量化辨识复杂系统动态风险，可以更好适应驾驶人、车辆和道路环境
- 20 的不同条件，从而平衡人-车-路微观交通系统。

- 25 相关技术中，人-车-路交互作用，尤其是人-车、车-路、人-路交互之间建模已经获得了广泛的研究。驾驶人（人）、车辆（车）、交通环境（路）三要素及其相互作用，构成了以自车为中心的微观交通系统基本单元。现有研究多从单一对象扩展至人-车、人-路、车-路交互视角，即较少从人-车-路统一视角出发。具体来说，现有的车-路耦合研究愈发深入，
- 30 但针对极限工况下的车-路交互耦合机理研究尚不清晰，当前关于车-路耦合机理的研究多基于轮胎动力学-道路动力学的作用机制来展开，难扩展构建统一视角下人车路闭环系统模型。而人车交互的研究多聚焦面向先进驾驶辅助系统的技术攻克，以车辆安全性为主要目标，鲜有系统考虑驾驶人对辅助系统的接受程度，存在宜人性较差的局限，势必需要通过深刻认识驾驶人驾驶认知特性，构建其认知模型，突破人车交互过程的信任问题，实现人车协
- 同驾驶。而人-路交互机理研究主要集中在单一车辆驾驶行为意图研究，对交互意图辨识研究尚不深入，因此需要构建人-路交互机理模型，探明自车驾驶人与周围交通参与者的交互机制，为规避碰撞风险的主动控制提供理论支撑。对于人-车-路闭环系统的研究多集中在狭义概念范围内，对某些因素过度简化，虽涵盖人车路交通要素，但缺乏统一、完整的系统

描述。因此，迫切需要一种全新可扩展的人车路统一建模方法，对该复杂系统展开描述，在此基础上掌握交通环境变化对车辆运行安全的影响规律，为交通管理者或车辆运动控制提供理论指导。

道路交通风险产生被认为是许多因素综合的结果，主要表现为驾驶人的生理和心理限制、车辆性能有限、道路路线不当以及恶劣天气造成的风险（如能见度低和道路湿滑）。针对人-车-路闭环系统这一复杂耦合对象，从行车风险形成开始到发生危险冲突的整个风险转化过程很难用单一的时空距离参数（实际车距、车间时间和碰撞时间等）进行描述，需要综合考虑多个时空距离参数并采用更复杂的模型和算法对系统运行风险进行研究。但现有基于车辆运动学、碰撞概率等方法对于人-车-路交通系统本身的建模不清晰，难将风险辨识的结果有效反馈于人-车-路交通系统进行安全辅助决策。因此，在复杂人-车-路交通系统中，需要充分考虑系统中多源多维的风险产生过程，辨识人-车-路耦合环境下的车辆行驶安全状态，构建人-车-路闭环系统风险辨识模型，进而更好实现人-车-路闭环系统运行本质安全。因此，有必要开发一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法。

发明内容

本申请提供一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法，以解决相关技术中对于人-车-路交通系统本身的建模不清晰，难将风险辨识的结果有效反馈于人-车-路交通系统进行安全辅助决策等问题。

本申请第一方面实施例提供一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法，包括以下步骤：利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互作用模型，得到车路交互产生的潜在事故后果；利用人车系统交互输出的行驶轨迹分布构建人-车动态交互作用模型，得到人车交互产生的行为不确定性；利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构建人-路动态交互作用模型，得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异；利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征，得到驾驶人个性化特性；根据所述车路交互产生的潜在事故后果、所述行为不确定性、所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异及所述驾驶人个性化特性构建人-车-路闭环动力学系统，生成风险辨识结果。

可选地，在本申请的一个实施例中，所述人-车-路闭环动力学系统表示为：

$$S_{DVR} = \gamma_i(t) * D_i * P_{x,y} * (\delta(t)) * \frac{\tilde{E}_i}{r'}$$

$$= \frac{1}{3.77\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\omega\Delta\delta)^2}{28.43}\right) * \frac{\sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2 * TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|} * \gamma_i(t) * D_i$$

其中， S_{DVR} 为人-车-路闭环动力学系统， $\gamma_i(t)$ 为所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的有效响应， D_i 为所述驾驶人个性化特性， $\delta(t)$ 为车辆转向角度， $P_{x,y} * (\delta(t))$ 为所

述行为不确定性, r' 为所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的驾驶兴趣区域半径, $\tilde{E}_i$ 为所述车路交互产生的潜在事故后果, ω 为转向, $\omega = 0$ 为车辆直行, $\omega > 0$ 代表左转, $\omega < 0$ 代表右转, $\Delta\delta$ 为在某一时间段 Δt 内转向角的增量, IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵, m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度, TTC 是
 5 避撞时间, $\xi(v_i) = a/b$, a 为椭圆长轴长度, b 为椭圆短轴长度, $v_i(t)$ 为自车 i 的速度, $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数。

为可选地, 在本申请的一个实施例中, 所述利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互作用模型, 得到车路交互产生的潜在事故后果, 包括: 计算场景中自车与不同道路交通参与者的交互数量; 计算交通环境中两个对象之间的交互后果;
 10 基于所述交互数量和所述交互后果, 生成在多个交通参与者与自车进行交互过程中叠加交互累计后果得到所述车路交互产生的潜在事故后果 $\tilde{E}_i$:

$$\tilde{E}_i = \sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2,$$

其中, IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵, m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度。

为可选地, 在本申请的一个实施例中, 所述利用人车系统交互输出的行驶轨迹分布构建人-车动态交互作用模型, 得到人车交互产生的行为不确定性, 包括: 根据车辆运动学模型和转弯半径计算等效线性两轮车模型, 并根据指令转向角计算预测位置; 基于采集的实际驾驶实验数据对驾驶人-车辆系统的不确定性运动进行预测; 基于所述预测位置和所述不确定性运动, 得到所述车辆转向角的转角角度的高斯正态分布, 并基于所述高斯正态分布
 20 进行参数确定, 确定所述人车交互产生的行为不确定性 $P_{x,y}(\delta(t))$:

$$P_{x,y}(\delta(t)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\delta(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

其中, $\delta(t)$ 为车辆转向角度, σ 为服从正态分布的数据分布的离散程度, μ 为服从正态分布的随机变量的均值。

可选地, 在本申请的一个实施例中, 所述利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构建人-路动态交互作用模型, 得到人路交互过程驾驶人风险敏
 25 感度差异, 包括:

利用驾驶人的视觉范围计算驾驶人正常驾驶过程中的有效响应;

利用驾驶人视觉椭圆形分布特性获取驾驶人动态视觉范围的等势线长度 $l\rho$:

$$l\rho = r' - \left(1 - \frac{a(v_i)}{b(v_i)}\right) r' |\sin\varphi_i(t)|;$$

其中, r' 为兴趣区域大小的半径, a 为椭圆长轴长度, b 为椭圆短轴长度, a 和 b 取值与
 1 自车 i 车速度 $v_i(t)$ 相关, $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数;

利用驾驶人视角变化对驾驶人的影响来感知车辆相对速度, 得到驾驶人动态感知视野
 影响, 生成驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域大小的半径:

$$r' = \frac{l\rho}{1 - \left(1 - \frac{a(v_i)}{b(v_i)}\right) |\sin\varphi_i(t)|} = \frac{TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|}$$

5 其中, TTC 是避撞时间, $\xi(v_i) = a/b$, $v_i(t)$ 为自车 i 的速度;

根据所述有效响应以及所述兴趣区域大小的半径确定所述人路交互过程驾驶人风险敏
 感度差异。

可选地, 在本申请的一个实施例中, 所述利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律
 和差异性进行表征, 得到驾驶人个性化特性, 包括: 区分每类驾驶人在同一场景下的操纵
 10 行为和轨迹相似度, 基于非监督聚类方法得到驾驶人的个性化表征; 基于所述驾驶人的个
 性化表征得到每个驾驶人的特性表征, 基于距离聚类中心的距离得到驾驶特性, 确定所述
 驾驶人个性化特性。

本申请第二方面实施例提供一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识装置, 包括: 第
 一建模模块, 用于利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互
 15 作用模型, 得到车路交互产生的潜在事故后果; 第二建模模块, 用于利用人车系统交互输
 出的行驶轨迹分布构建人-车动态交互作用模型, 得到人车交互产生的行为不确定性; 第三
 建模模块, 用于利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构
 建人-路动态交互作用模型, 得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异; 表征模块, 用于利
 用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征, 得到驾驶人个性化特性; 辨
 20 识模块, 用于根据所述车路交互产生的潜在事故后果、所述行为不确定性、所述人路交互
 过程驾驶人风险敏感度差异及所述驾驶人个性化特性构建人-车-路闭环动力学系统, 生成风
 险辨识结果。

可选地, 在本申请的一个实施例中, 所述人-车-路闭环动力学系统表示为:

$$S_{DVR} = \gamma_i(t) * D_i * P_{x,y} * (\delta(t)) * \frac{\tilde{E}_i}{r'} \\ = \frac{1}{3.77\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\omega\Delta\delta)^2}{28.43}\right) * \frac{\sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2 * TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|} * \gamma_i(t) * D_i$$

其中, S_{DVR} 为人-车-路闭环动力学系统, $\gamma_i(t)$ 为所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差
 25 异中的有效响应, D_i 为所述驾驶人个性化特性, $\delta(t)$ 为车辆转向角度, $P_{x,y} * (\delta(t))$ 为所述
 行为不确定性, r' 为所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的驾驶兴趣区域半径, $\tilde{E}_i$ 为

所述车路交互产生的潜在事故后果, ω 为转向, $\omega = 0$ 为车辆直行, $\omega > 0$ 代表左转, $\omega < 0$ 代表右转, $\Delta\delta$ 为在某一时间段 Δt 内转向角的增量, IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵, m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度, TTC 是避撞时间, $\xi(v_i) = a/b$, a 为椭圆长轴长度, b 为椭圆短轴长度, $v_i(t)$ 为自车 i 的速度, $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数。

本申请第三方面实施例提供一种电子设备, 包括: 存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序, 所述处理器执行所述程序, 以实现如上述实施例所述的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法。

本申请第四方面实施例提供一种计算机可读存储介质, 其上存储有计算机程序, 该程序被处理器执行, 以用于实现如上述实施例所述的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法。

本申请实施例的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法及装置, 具有以下优势:

1) 本申请分析了人、车、路及环境等本源属性和交互特性, 构建人-车-路微观交通系统的统一数学模型, 能作为整体输入到交通系统进行状态分析。

2) 本申请构建模型表征驾驶人因素、车辆运动状态、道路环境信息交互过程对系统安全状态的影响, 揭示了微观交通系统风险产生机理, 可以实现系统风险辨识与分级预警, 进一步保障人车路交通系统本质安全。

3) 本申请相比避撞时间 (Time To Collision, TTC)、车头时距 (Time Headway, THW) 等其他风险指标, 在具有任意道路拓扑的场景(十字路口、环形路、高速公路等)中, 都可以对人-车-路微观交通系统进行危险态势辨识, 并辅助车辆进行驾驶风险分级决策。有助于在复杂的交通环境下对临近危险状态的驾驶人给予及时的警告或辅助纠正, 为防撞预警策略和控制方法的研究提供了新的思路。

本申请附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出, 部分将从下面的描述中变得明显, 或通过本申请的实践了解到。

附图说明

本申请上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解, 其中:

图 1 为根据本申请实施例提供的一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法的流程图;

图 2 为根据本申请实施例提供的一种高速公路场景下转向角角度高斯分布图;

图 3 为根据本申请实施例提供的一种驾驶操作注视区域划分图;

图 4 为根据本申请实施例提供的一种人-车-环境要素耦合关系示意性框架图；

图 5 为根据本申请实施例提供的一种多车道换道避障场景下人车路系统模型风险演变示意图；

图 6 为根据本申请实施例的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识装置的示例图；

5 图 7 为申请实施例提供的电子设备的结构示意图。

附图标记说明：第一建模模块-100、第二建模模块-200、第三建模模块-300、表征模块-400、辨识模块-500、存储器-701、处理器-702、通信接口-703。

具体实施方式

10 下面详细描述本申请的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本申请，而不能理解为对本申请的限制。

具体而言，图 1 为根据本申请实施例提供的一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法的流程图。

15 如图 1 所示，该人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法包括以下步骤：

在步骤 S101 中，利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互作用模型，得到车路交互产生的潜在事故后果。

20 可选地，在本申请的一个实施例中，利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互作用模型，得到车路交互产生的潜在事故后果，包括：计算场景中自车与不同道路交通参与者的交互数量；计算交通环境中两个对象之间的交互后果；基于交互数量和交互后果，生成在多个交通参与者与自车进行交互过程中叠加交互累计后果得到车路交互产生的潜在事故后果。

25 具体地，人车路微观交通系统运行过程中，自车和道路交通参与者之间会存在多类型交互行为，为表征交互过程产生的可能后果，针对不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用进行建模，获取车路交互产生的潜在事故后果 $\tilde{E}_i$ 。

首先，计算场景中自车与不同道路交通参与者的交互数量。在任意一个场景下，场景中包含不同道路交通参与者 $J = [j_0, j_1, j_2, \dots, j_n]$ ，自车 i 与参与者 j 进行交互可以用交互矩阵 IN 来表征， $IN = \begin{bmatrix} in_{0,0} & \dots & in_{0,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ in_{n,0} & \dots & in_{n,n} \end{bmatrix}$ 。其中 $in_{0,0} = 1$ 表示自车与其他道路交通参与者 j 进行交互，而 $in_{0,0} = 0$ 表示不交互。

30 其次，计算交通环境中两个对象之间的交互后果；考虑交互过程如不进行及时防控则会出现碰撞事故，产生实体之间能量转移，即在发生碰撞的情况下，产生的后果可以看作

是碰撞实体之间的能量传递，即：

$$E_i = \frac{1}{2} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j\|^2$$

其中， E_i 表示自车 i 的传递能量， m_i, m_j 和 $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ 分别是自车 i 与另一个实体 j 的质量和速度(矢量)。

最后，在多个交通参与者与自车进行交互过程中，即将交互累计后果进行叠加得到车
5 路交互产生的潜在事故后果：

$$\tilde{E}_i = \sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j\|^2。$$

在步骤 S102 中，利用人车系统交互输出的行驶轨迹分布构建人-车动态交互作用模型，得到人车交互产生的行为不确定性。

可选地，在本申请的一个实施例中，利用人车系统交互输出的行驶轨迹分布构建人-车
10 动态交互作用模型，得到人车交互产生的行为不确定性，包括：根据车辆运动学模型和转弯半径计算等效线性两轮车模型，并根据指令转向角计算预测位置；基于采集的实际驾驶实验数据对驾驶人-车辆系统的不确定性运动进行预测；基于预测位置和不确定性运动，得到车辆转向角的转角角度的高斯正态分布，并基于高斯正态分布进行参数确定，确定人车交互产生的行为不确定性。

15 具体地，在人和车辆交互过程中，车辆相当于一个的带反馈的执行机构，其能够受到驾驶人意图的不确定性和动态调整的驾驶目标的激励，输出车辆的行驶过程动态响应，则可将人车系统交互输出用行驶轨迹分布来进行描述，输出人车交互产生的行为不确定性 $P_{x,y}(\delta(t))$ 。

首先，假设正常驾驶人驾驶遵守交通规则和法律。因此，车辆正常行驶时主要进行直
20 行、左转、右转操纵行为，并伴随速度的动态调整。根据车辆运动学模型，转弯半径 R 可以用等效线性两轮车模型计算如下：

$$R(t) = [1 + K v_i^2(t)] \frac{L}{\delta(t)}$$

其中， K 为稳定系数， L 为车辆 i 的轴距， $\delta(t)$ 为车辆转向角度。

当车辆 i 以可忽略侧滑角的恒定速度行驶时，在指令转向角 δ 下，预测位置 $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 可计算为：

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_i \\ \tilde{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t + \int_t^{t+\Delta t} v_i(t) \cdot \cos \frac{v_i(t)}{R(t)} dt \\ y_t + \int_t^{t+\Delta t} v_i(t) \cdot \sin \frac{v_i(t)}{R(t)} dt \end{bmatrix}$$

25 其次，根据转向角范围，车辆 i 的可能运动轨迹应具有一定的边界，并且车辆 i 的运动

状态绝对稳定在该边界内。当车辆 i 在道路上直线行驶时，驾驶人可能进行直线行驶，转向左侧车道，转向右侧车道。为确定驾驶人操纵车辆后，车辆输出的位置范围，可基于实际驾驶实验数据，对驾驶人-车辆系统的不确定性运动进行预测。

最后，统计车辆转向角度得出转角角度分布基本呈现高斯正态分布，并可基于实验数据对高斯分布进行参数确定：

$$P_{x,y}(\delta(t)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\delta(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

其中， $\delta(t)$ 为车辆转向角度， σ 为服从正态分布的数据分布的离散程度， μ 为服从正态分布的随机变量的均值。

参见图 2，本申请实施例提供的高速公路场景下转向角角度高斯分布图所示，假设以北京市一段环行路的实际数据采集结果作为输入，可以拟合得到高斯分布的具体参数得：

10 $\mu = 0, \sigma = 3.77$ ，则输出转角角度分布为：

$$P_{x,y}(\delta(t)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\delta(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) = \frac{1}{3.77\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\omega\Delta\delta)^2}{28.43}\right)$$

在不同环境下，由于不同驾驶人操控车辆特性的差异性，会导致高斯分布的具体参数有一点差异，但整体趋势具有一致性，即驾驶人操控车辆过程的转向响应幅度呈高斯分布。

在步骤 S103 中，利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构建人-路动态交互作用模型，得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异。

15 可选地，在本申请的一个实施例中，利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构建人-路动态交互作用模型，得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异，包括：利用驾驶人的视觉范围计算驾驶人正常驾驶过程中的有效响应；利用驾驶人视觉椭圆形分布特性获取驾驶人动态视觉范围的等势线长度；利用驾驶人视角变化对驾驶人的影响来感知车辆相对速度，得到驾驶人动态感知视野影响，生成驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域大小的半径，根据有效响应以及兴趣区域大小的半径确定人路交互过程驾驶人风险敏感度差异。

具体地，驾驶人在驾驶过程中主要依靠视觉获取信息，因此驾驶人与道路环境的交互主要受驾驶人视觉效应的影响。根据驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域进行建模，输出人路交互过程驾驶人风险敏感度差异（包括有效响应 $\gamma_i(t)$ 、驾驶兴趣区域半径 r' ）。

首先，计算驾驶人正常驾驶过程中的有效响应。驾驶人对于周围环境的响应随着其视角和扫描频率而变化，并对道路环境中其他车辆与其自身的相对距离和相对速度的感知最为敏锐。驾驶员正前方位为驾驶员的敏锐视觉区、驾驶员必须经常关注并且及时做出反应。

而敏锐视觉区两边、相邻车道的前方区域是驾驶员的一般视觉区，但在驾驶过程中也时常关注，这是因为邻道的车可能插进来，同时自己也可能需要换到邻道。而两侧的区域，即外围视觉区则很少关注，车辆的后方由于视觉特性和责任认定等因素通常会被忽略。假设驾驶员对于周围环境做出的反应为 γ_i ，是其视角 φ_i 的函数，其中 $\varphi_i = [-\pi, \pi]$ 是驾驶员的视角。比如，取驾驶人有效响应 $\gamma_i(0) = 1, \gamma_i(\pi) = 0$ ，那么当正前方出现状况时，驾驶员对于做出 100% 的响应，而对于正后方尾随的车辆则处于忽略状态。

其次，参见图 3，本申请实施例提供的驾驶操作注视区域划分图所示，根据驾驶人视觉椭圆形分布特性，假设驾驶人处于椭圆的一个焦点处 F_1 处，而驾驶人动态视野与车速成反比，车速越快视野也越窄，忽略正后方的视觉区域，可以得出在 $\varphi_i = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 的动态视觉范围的等势线长度：

$$l\rho = r' - \left(1 - \frac{a(v_i)}{b(v_i)}\right) r' |\sin\varphi_i(t)|$$

式中， $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数， l 为等势线上点距离 i 车的距离， a 为椭圆长轴长度， b 为椭圆短轴长度，其取值与 i 车速度 $v_i(t)$ 相关。即速度越快，视线范围变窄。

再次，根据驾驶人视觉特性，视角的变化对驾驶人的影响从而可以感知车辆相对速度，进而影响驾驶人动态感知视野，即影响 $l\rho$ 。视角变化率 $d\varphi_i$ 与 $l\rho$ 有如下关系：

$$l\rho(t) = \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \approx \frac{\Delta v}{D_p^2} = \text{TTC} * v_i(t)$$

其中， Δv 为车辆的相对速度； D_p 为车辆间距，TTC是避撞时间（s）， v_i 是车辆 i 行驶速度。

将上式进行变化，定义 $\xi(v_i) = a/b$ ，可求得等效半径为：

$$r' = \frac{l\rho}{1 - \left(1 - \frac{a(v_i)}{b(v_i)}\right) |\sin\varphi_i(t)|} = \frac{\text{TTC} * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|}$$

其中，TTC是避撞时间， $\xi(v_i) = a/b$ ， $v_i(t)$ 为自车 i 的速度，即可定义驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域大小的半径为 r' 。

在步骤 S104 中，利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征，得到驾驶人个性化特性。

可选地，在本申请的一个实施例中，利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征，得到驾驶人个性化特性，包括：区分每类驾驶人在同一场景下的操纵行为和轨迹相似度，基于非监督聚类方法得到驾驶人的个性化表征；基于驾驶人的个性化表征得到每个驾驶人的特性表征，基于距离聚类中心的距离得到驾驶特性，确定驾驶人个性化

特性。

具体地，由于驾驶人个体的差异性及工况的复杂性，在真实交通场景下驾驶人主动行为呈现出高度随机性和非线性等特征。因此，利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征，输出驾驶人个性化特性 D_i 。

- 5 首先，不同年龄、不同性别、不同性格、不同驾龄和不同驾驶熟练程度等都会对驾驶习性产生显著影响，驾驶人的个性化表征对系统稳定性密切相关。按照每类驾驶员在同一场景下的操纵行为和轨迹相似度进行区分，基于非监督聚类方法输出 3 个聚类中心 $(C1_{x,y}, C2_{x,y}, C3_{x,y})$ ，将驾驶员分为 3 类，定义为激进型 A、正常型 B 和保守型 C。

- 10 其次，进行个性化驾驶人特性表征，可以表示为该驾驶人行为（如操纵轨迹）再进行聚类 $Ci_{x,y}$ ，分别得出距离 3 个聚类中心的距离 $(|Ci_{x,y} - C1_{x,y}|, |Ci_{x,y} - C2_{x,y}|, |Ci_{x,y} - C3_{x,y}|)$ ，并计算距离比例为：

$$k_1 = \frac{|Ci_{x,y} - C1_{x,y}|}{|Ci_{x,y} - C1_{x,y}| + |Ci_{x,y} - C2_{x,y}| + |Ci_{x,y} - C3_{x,y}|}$$

$$k_2 = \frac{|Ci_{x,y} - C2_{x,y}|}{|Ci_{x,y} - C1_{x,y}| + |Ci_{x,y} - C2_{x,y}| + |Ci_{x,y} - C3_{x,y}|}$$

$$k_3 = \frac{|Ci_{x,y} - C3_{x,y}|}{|Ci_{x,y} - C1_{x,y}| + |Ci_{x,y} - C2_{x,y}| + |Ci_{x,y} - C3_{x,y}|}$$

即可获得该驾驶人的驾驶特性为 $(D_i = k_1A + k_2B + k_3C)$ 。

在步骤 S105 中，根据车路交互产生的潜在事故后果、行为不确定性、人路交互过程驾驶人风险敏感度差异及驾驶人个性化特性构建人-车-路闭环动力学系统，生成风险辨识结果。

- 15 可选地，在本申请的一个实施例中，人-车-路闭环动力学系统表示为：

$$S_{DVR} = \gamma_i(t) * D_i * P_{x,y} * (\delta(t)) * \frac{\tilde{E}_l}{r'}$$

其中， S_{DVR} 为人-车-路闭环动力学系统， $\gamma_i(t)$ 为人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的有效响应， D_i 为驾驶人个性化特性， $\delta(t)$ 为车辆转向角度， $P_{x,y} * (\delta(t))$ 为行为不确定性， r' 为人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的驾驶兴趣区域半径， $\tilde{E}_l$ 为车路交互产生的潜在事故后果。

- 20 具体地，通过分别对车-路、人-车、人-路的交互作用进行建模，即通过车路交互产生的潜在事故后果 $\tilde{E}_l$ ，人车交互产生的行为不确定性 $P_{x,y}(\delta(t))$ 和人路交互过程驾驶人风险敏感度差异（包括有效响应 $\gamma_i(t)$ 、驾驶兴趣区域半径 r' ，驾驶人个性化特性 D_i ），最终以统一

视角构建人-车-路闭环动力学系统。系统统一模型 S_{DVR} 表示如下：

$$S_{DVR} = \gamma_i(t) * D_i * P_{x,y} * (\delta(t)) * \frac{\tilde{E}_i}{r'}$$

$$= \frac{1}{3.77\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\omega\Delta\delta)^2}{28.43}\right) * \frac{\sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2 * TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|} * \gamma_i(t) * D_i$$

其中， S_{DVR} 为人-车-路闭环动力学系统， $\gamma_i(t)$ 为人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的有效响应， D_i 为驾驶人个性化特性， $\delta(t)$ 为车辆转向角度， $P_{x,y} * (\delta(t))$ 为行为不确定性， r' 为人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的驾驶兴趣区域半径， $\tilde{E}_i$ 为车路交互产生的潜在事故后果， ω 为转向， $\omega = 0$ 为车辆直行， $\omega > 0$ 代表左转， $\omega < 0$ 代表右转， $\Delta\delta$ 为在某一时间段 Δt 内转向角的增量， IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵， m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度， TTC 是避撞时间， $\xi(v_i) = a/b, a$ 为椭圆长轴长度， b 为椭圆短轴长度， $v_i(t)$ 为自车 i 的速度， $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数。

参见图4，采用本申请实施例提供的人-车-环境要素耦合关系示意性框架图所示，复杂工况下，汽车驾驶环境复杂，运行状态多样，驾驶员驾驶风格和驾驶体验不同，驾驶员、车辆、道路环境相互耦合形成一个复杂、广义的动力学系统，系统安全性受驾驶员交互作用的影响，车辆和道路。人-车-路闭环系统具有很强的非线性、耦合和时变特性。

从整体上看，车辆相当于一个控制系统，车辆的运动就像控制器的操作。驾驶车辆时，驾驶员观察周围的环境，如路况、视野内可见的物体等，并向车辆发送相应的信号，即应用于方向盘、刹车、油门踏板的操作信号。随后，驾驶员通过眼、耳等感觉器官接收到来自车辆的状态反馈信号，并据此调整控制。同时，环境也会影响驾驶员和车辆。如果路况较差，车辆可能无法准确响应控制操作，或者驾驶员的驾驶行为可能发生变化。所以环境是影响车辆控制系统的噪声和干扰的一部分。

通过在车辆上添加控制器，它可以对车辆故障或难以控制的情况进行调整。通过环境输入，控制器了解驾驶环境和道路状况，通过驾驶员输入，控制器了解驾驶员的运行状态。通常还要求控制器根据车辆自身的驾驶状况，如转向角度、制动或牵引力矩等，向车辆提供信号，以调整驾驶员的行为。因此，整个人车路系统可以表示为如图4所示。

如图5所示，行车风险属于人-车-路闭环系统的广义失稳，通常由驾驶人、道路条件、以及车辆本身的动力学特性共同决定。以多车道换道避障场景为例，初始时刻，驾驶人驾驶车辆在路况良好平直路段正常驾驶，此阶段系统状态为 $S_{DVR,0}$ ，当车辆行驶车道前方出现障碍，驾驶人发现前方障碍后将会开始松开加速踏板或踩下制动踏板实现车辆减速，以保持和前方障碍车的相对安全距离，人-车-路系统状态变化为 $S_{DVR,1}$ ，随后驾驶人持续减速过

程中,车速不断降低,自车与障碍车之间距离不断缩短,人-车-路系统状态由 $S_{DVR,1}$ 演变为状态 $S_{DVR,2}$,当驾驶人出现突然失误时,人-车-路系统状态由 $S_{DVR,2}$ 演变为状态 $S_{DVR,3}$,事故发生。

根据本申请实施例提出的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法,用于表征驾驶人因素、车辆运动状态、道路环境信息交互过程对系统安全状态的影响,揭示了微观交通系统风险产生机理,实现系统风险辨识与分级预警。该人-车-路统一模型分析了人、车、路及环境等本源属性和交互特性,在具有任意道路拓扑的场景(十字路口、环形路、高速公路等)中,都可以对人-车-路微观交通系统进行危险态势辨识,并辅助车辆进行驾驶风险分级决策。该方法有助于在复杂的交通环境下对临近危险状态的驾驶人给予及时的警告或辅助纠正,为防撞预警策略和控制方法的研究提供了新的思路。

其次参照附图描述根据本申请实施例提出的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识装置。

图6为根据本申请实施例的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识装置的示例图。

如图6所示,该人-车-路微观交通系统建模及风险辨识装置10包括:第一建模模块100、第二建模模块200、第三建模模块300、表征模块400和辨识模块500。

其中,第一建模模块100,用于利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互作用模型,得到车路交互产生的潜在事故后果。第二建模模块200,用于利用人车系统交互输出的行驶轨迹分布构建人-车动态交互作用模型,得到人车交互产生的行为不确定性。第三建模模块300,用于利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构建人-路动态交互作用模型,得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异。表征模块400,用于利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征,得到驾驶人个性化特性。辨识模块500,用于根据车路交互产生的潜在事故后果、行为不确定性、人路交互过程驾驶人风险敏感度差异及驾驶人个性化特性构建人-车-路闭环动力学系统,生成风险辨识结果。

可选地,在本申请的一个实施例中,人-车-路闭环动力学系统表示为:

$$S_{DVR} = \gamma_i(t) * D_i * P_{x,y} * (\delta(t)) * \frac{\tilde{E}_i}{r'}$$

$$= \frac{1}{3.77\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\omega\Delta\delta)^2}{28.43}\right) * \frac{\sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2 * TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|} * \gamma_i(t) * D_i$$

其中, S_{DVR} 为人-车-路闭环动力学系统, $\gamma_i(t)$ 为人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的有效响应, D_i 为驾驶人个性化特性, $\delta(t)$ 为车辆转向角度, $P_{x,y} * (\delta(t))$ 为行为不确定性, r' 为人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的驾驶兴趣区域半径, $\tilde{E}_i$ 为车路交互产生的潜在

事故后果, ω 为转向, $\omega = 0$ 为车辆直行, $\omega > 0$ 代表左转, $\omega < 0$ 代表右转, $\Delta\delta$ 为在某一段时间 Δt 内转向角的增量, IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵, m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度, TTC是避撞时间, $\xi(v_i) = a/b$, a 为椭圆长轴长度, b 为椭圆短轴长度, $v_i(t)$ 为自车 i 的速度, $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数。

5 可选地, 在本申请的一个实施例中, 第一建模模块, 具体用于计算场景中自车与不同道路交通参与者的交互数量; 计算交通环境中两个对象之间的交互后果; 基于交互数量和交互后果, 生成在多个交通参与者与自车进行交互过程中叠加交互累计后果得到车路交互产生的潜在事故后果 $\tilde{E}_i$:

$$\tilde{E}_i = \sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2。$$

10 其中, IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵, m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度。

可选地, 在本申请的一个实施例中, 第二建模模块, 具体用于, 根据车辆运动学模型和转弯半径计算等效线性两轮车模型, 并根据指令转向角计算预测位置; 基于采集的实际驾驶实验数据对驾驶人-车辆系统的不确定性运动进行预测; 基于预测位置和不确定性运
15 动, 得到车辆转向角的转角角度的高斯正态分布, 并基于高斯正态分布进行参数确定, 确定人车交互产生的行为不确定性 $P_{x,y}(\delta(t))$:

$$P_{x,y}(\delta(t)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\delta(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

其中, $\delta(t)$ 为车辆转向角度, σ 为服从正态分布的数据分布的离散程度, μ 为服从正态分布的随机变量的均值。

可选地, 在本申请的一个实施例中, 第三建模模块, 具体用于, 利用驾驶人的视觉范
20 围计算驾驶人正常驾驶过程中的有效响应;

利用驾驶人视觉椭圆形分布特性获取驾驶人动态视觉范围的等势线长度 $l\rho$:

$$l\rho = r' - \left(1 - \frac{a(v_i)}{b(v_i)}\right) r' |\sin\varphi_i(t)|;$$

其中, r' 为兴趣区域大小的半径, a 为椭圆长轴长度, b 为椭圆短轴长度, a 和 b 取值与自车 i 车速度 $v_i(t)$ 相关, $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数;

25 利用驾驶人视角变化对驾驶人的影响来感知车辆相对速度, 得到驾驶人动态感知视野影响, 生成驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域大小的半径:

$$r' = \frac{l\rho}{1 - \left(1 - \frac{a(v_i)}{b(v_i)}\right) |\sin\varphi_i(t)|} = \frac{TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|}$$

其中, TTC是避撞时间, $\xi(v_i) = a/b$, $v_i(t)$ 为自车 i 的速度;

根据有效响应以及兴趣区域大小的半径确定人路交互过程驾驶人风险敏感度差异。

可选地, 在本申请的一个实施例中, 表征模块, 具体用于, 区分每类驾驶人在同一场景下的操纵行为和轨迹相似度, 基于非监督聚类方法得到驾驶人的个性化表征; 基于驾驶人的个性化表征得到每个驾驶人的特性表征, 基于距离聚类中心的距离得到驾驶特性, 确定驾驶人个性化特性。

需要说明的是, 前述对人-车-路微观交通系统建模及风险辨识实施例的解释说明也适用于该实施例的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识装置, 此处不再赘述。

根据本申请实施例提出的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识装置, 用于表征驾驶人因素、车辆运动状态、道路环境信息交互过程对系统安全状态的影响, 揭示了微观交通系统风险产生机理, 实现系统风险辨识与分级预警。该人-车-路统一模型分析了人、车、路及环境等本源属性和交互特性, 在具有任意道路拓扑的场景(十字路口、环形路、高速公路等)中, 都可以对人-车-路微观交通系统进行危险态势辨识, 并辅助车辆进行驾驶风险分级决策。有助于在复杂的交通环境下对临近危险状态的驾驶人给予及时的警告或辅助纠正, 为防撞预警策略和控制方法的研究提供了新的思路。

图 7 为本申请实施例提供的电子设备的结构示意图。该电子设备可以包括:

存储器 701、处理器 702 及存储在存储器 701 上并可在处理器 702 上运行的计算机程序。

处理器 702 执行程序时实现上述实施例中提供的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法。

进一步地, 电子设备还包括:

通信接口 703, 用于存储器 701 和处理器 702 之间的通信。

存储器 701, 用于存放可在处理器 702 上运行的计算机程序。

存储器 701 可能包含高速 RAM 存储器, 也可能还包括非易失性存储器 (non-volatile memory), 例如至少一个磁盘存储器。

如果存储器 701、处理器 702 和通信接口 703 独立实现, 则通信接口 703、存储器 701 和处理器 702 可以通过总线相互连接并完成相互间的通信。总线可以是工业标准体系结构 (Industry Standard Architecture, 简称为 ISA) 总线、外部设备互连 (Peripheral Component, 简称为 PCI) 总线或扩展工业标准体系结构 (Extended Industry Standard Architecture, 简称为 EISA) 总线等。总线可以分为地址总线、数据总线、控制总线等。为便于表示, 图 7 中仅用一条粗线表示, 但并不表示仅有一根总线或一种类型的总线。

可选的, 在具体实现上, 如果存储器 701、处理器 702 及通信接口 703, 集成在一块芯

片上实现，则存储器 701、处理器 702 及通信接口 703 可以通过内部接口完成相互间的通信。

处理器 702 可能是一个中央处理器（Central Processing Unit，简称为 CPU），或者是特定集成电路（Application Specific Integrated Circuit，简称为 ASIC），或者是被配置成实施本申请实施例的一个或多个集成电路。

本实施例还提供一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，其特征在于，该程序被处理器执行时实现如上的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法。

在本说明书的描述中，参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本申请的至少一个实施例或示例中。在本说明书中，对上述术语的示意性表述不必须针对的是相同的实施例或示例。而且，描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或 N 个实施例或示例中以合适的方式结合。此外，在不相互矛盾的情况下，本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

此外，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本申请的描述中，“N 个”的含义是至少两个，例如两个，三个等，除非另有明确具体的限定。

流程图中或在此以其他方式描述的任何过程或方法描述可以被理解为，表示包括一个或更 N 个用于实现定制逻辑功能或过程的步骤的可执行指令的代码的模块、片段或部分，并且本申请的优选实施方式的范围包括另外的实现，其中可以不按所示出或讨论的顺序，包括根据所涉及的功能按基本同时的方式或按相反的顺序，来执行功能，这应被本申请的实施例所属技术领域的技术人员所理解。

应当理解，本申请的各部分可以用硬件、软件、固件或它们的组合来实现。在上述实施方式中，N 个步骤或方法可以用存储在存储器中且由合适的指令执行系统执行的软件或固件来实现。如，如果用硬件来实现和在另一实施方式中一样，可用本领域公知的下列技术中的任一项或它们的组合来实现：具有用于对数据信号实现逻辑功能的逻辑门电路的离散逻辑电路，具有合适的组合逻辑门电路的专用集成电路，可编程门阵列（PGA），现场可编程门阵列（FPGA）等。

本技术领域的普通技术人员可以理解实现上述实施例方法携带的全部或部分步骤是可

以通过程序来指令相关的硬件完成，所述的程序可以存储于一种计算机可读存储介质中，该程序在执行时，包括方法实施例的步骤之一或其组合。

权利要求书

1、一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法，其特征在于，包括以下步骤：

利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互作用模型，得到车路交互产生的潜在事故后果；

利用人车系统交互输出的行驶轨迹分布构建人-车动态交互作用模型，得到人车交互产生的行为不确定性；

利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构建人-路动态交互作用模型，得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异；

利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征，得到驾驶人个性化特性；以及

根据所述车路交互产生的潜在事故后果、所述行为不确定性、所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异及所述驾驶人个性化特性构建人-车-路闭环动力学系统，生成风险辨识结果。

2、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述人-车-路闭环动力学系统表示为：

$$S_{DVR} = \gamma_i(t) * D_i * P_{x,y} * (\delta(t)) * \frac{\tilde{E}_i}{r'}$$

$$= \frac{1}{3.77\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\omega\Delta\delta)^2}{28.43}\right) * \frac{\sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2 * TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|} * \gamma_i(t) * D_i$$

其中， S_{DVR} 为人-车-路闭环动力学系统， $\gamma_i(t)$ 为所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的有效响应， D_i 为所述驾驶人个性化特性， $\delta(t)$ 为车辆转向角度， $P_{x,y} * (\delta(t))$ 为所述行为不确定性， r' 为所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的驾驶兴趣区域半径， $\tilde{E}_i$ 为所述车路交互产生的潜在事故后果， ω 为转向， $\omega = 0$ 为车辆直行， $\omega > 0$ 代表左转， $\omega < 0$ 代表右转， $\Delta\delta$ 为在某一时间段 Δt 内转向角的增量， IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵， m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度， TTC 是避撞时间， $\xi(v_i) = a/b$ 为， a 为椭圆长轴长度， b 为椭圆短轴长度， $v_i(t)$ 为自车 i 的速度， $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数。

3、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互作用模型，得到车路交互产生的潜在事故后果，包括：

计算场景中自车与不同道路交通参与者的交互数量；

计算交通环境中两个对象之间的交互后果；

基于所述交互数量和所述交互后果，生成在多个交通参与者与自车进行交互过程中叠

加交互累计后果得到所述车路交互产生的潜在事故后果 $\tilde{E}_i$:

$$\tilde{E}_i = \sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2,$$

其中, IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵, m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度。

- 5 4、根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述利用人车系统交互输出的行驶轨迹分布构建人-车动态交互作用模型, 得到人车交互产生的行为不确定性, 包括:

根据车辆运动学模型和转弯半径计算等效线性两轮车模型, 并根据指令转向角计算预测位置;

基于采集的实际驾驶实验数据对驾驶人-车辆系统的不确定性运动进行预测;

- 10 基于所述预测位置和所述不确定性运动, 得到所述车辆转向角的转角角度的高斯正态分布, 并基于所述高斯正态分布进行参数确定, 确定所述人车交互产生的行为不确定性 $P_{x,y}(\delta(t))$:

$$P_{x,y}(\delta(t)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\delta(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

其中, $\delta(t)$ 为车辆转向角度, σ 为服从正态分布的数据分布的离散程度, μ 为服从正态分布的随机变量的均值。

- 15 5、根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构建人-路动态交互作用模型, 得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异, 包括:

利用驾驶人的视觉范围计算驾驶人正常驾驶过程中的有效响应;

利用驾驶人视觉椭圆形分布特性获取驾驶人动态视觉范围的等势线长度 $l\rho$:

20
$$l\rho = r' - \left(1 - \frac{a(v_i)}{b(v_i)}\right) r' |\sin\varphi_i(t)|;$$

其中, r' 为兴趣区域大小的半径, a 为椭圆长轴长度, b 为椭圆短轴长度, a 和 b 取值与自车 i 车速度 $v_i(t)$ 相关, $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数;

利用驾驶人视角变化对驾驶人的影响来感知车辆相对速度, 得到驾驶人动态感知视野影响, 生成驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域大小的半径:

$$r' = \frac{l\rho}{1 - \left(1 - \frac{a(v_i)}{b(v_i)}\right) |\sin\varphi_i(t)|} = \frac{TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|}$$

- 25 其中, TTC 是避撞时间, $\xi(v_i) = a/b$, $v_i(t)$ 为自车 i 的速度;

根据所述有效响应以及所述兴趣区域大小的半径确定所述人路交互过程驾驶人风险敏

感度差异。

6、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征，得到驾驶人个性化特性，包括：

5 区分每类驾驶人在同一场景下的操纵行为和轨迹相似度，基于非监督聚类方法得到驾驶人的个性化表征；

基于所述驾驶人的个性化表征得到每个驾驶人的特性表征，基于距离聚类中心的距离得到驾驶特性，确定所述驾驶人个性化特性。

7、一种人-车-路微观交通系统建模及风险辨识装置，其特征在于，包括：

10 第一建模模块，用于利用不同类型的车与道路交通参与者之间的交互作用构建车-路动态交互作用模型，得到车路交互产生的潜在事故后果；

第二建模模块，用于利用人车系统交互输出的行驶轨迹分布构建人-车动态交互作用模型，得到人车交互产生的行为不确定性；

第三建模模块，用于利用驾驶人视觉特性对驾驶人驾驶过程中观察道路周边环境的兴趣区域构建人-路动态交互作用模型，得到人路交互过程驾驶人风险敏感度差异；

15 表征模块，用于利用聚类思想将驾驶人驾驶习性的特征规律和差异性进行表征，得到驾驶人个性化特性；以及

辨识模块，用于根据所述车路交互产生的潜在事故后果、所述行为不确定性、所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异及所述驾驶人个性化特性构建人-车-路闭环动力学系统，生成风险辨识结果。

20 8、根据权利要求7所述的装置，其特征在于，所述人-车-路闭环动力学系统表示为：

$$S_{DVR} = \gamma_i(t) * D_i * P_{x,y} * (\delta(t)) * \frac{\tilde{E}_i}{r'}$$

$$= \frac{1}{3.77\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\omega\Delta\delta)^2}{28.43}\right) * \frac{\sum \frac{1}{2} IN \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \|v_i - v_j\|^2 * TTC * v_i(t)}{1 - (1 - \xi(v_i)) |\sin\varphi_i(t)|} * \gamma_i(t) * D_i$$

其中， S_{DVR} 为人-车-路闭环动力学系统， $\gamma_i(t)$ 为所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的有效响应， D_i 为所述驾驶人个性化特性， $\delta(t)$ 为车辆转向角度， $P_{x,y} * (\delta(t))$ 为所述行为不确定性， r' 为所述人路交互过程驾驶人风险敏感度差异中的驾驶兴趣区域半径， $\tilde{E}_i$ 为所述车路交互产生的潜在事故后果， ω 为转向， $\omega = 0$ 为车辆直行， $\omega > 0$ 代表左转， $\omega < 0$ 代表右转， $\Delta\delta$ 为在某一时间段 Δt 内转向角的增量， IN 为自车 i 与道路交通参与者 j 进行交互的交互矩阵， m_i, m_j 和 v_i, v_j 分别是自车 i 与另一个道路交通参与者 j 的质量和速度， TTC 是避撞时间， $\xi(v_i) = a/b$ ， a 为椭圆长轴长度， b 为椭圆短轴长度， $v_i(t)$ 为自车 i 的速度， $\varphi_i(t)$ 为驾驶人的视角函数。

25

9、一种电子设备，其特征在于，包括：存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序，以实现如权利要求 1-6 任一项所述的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法。

10、一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，其特征在于，该程序被处理器执行，以用于实现如权利要求1-6任一项所述的人-车-路微观交通系统建模及风险辨识方法。

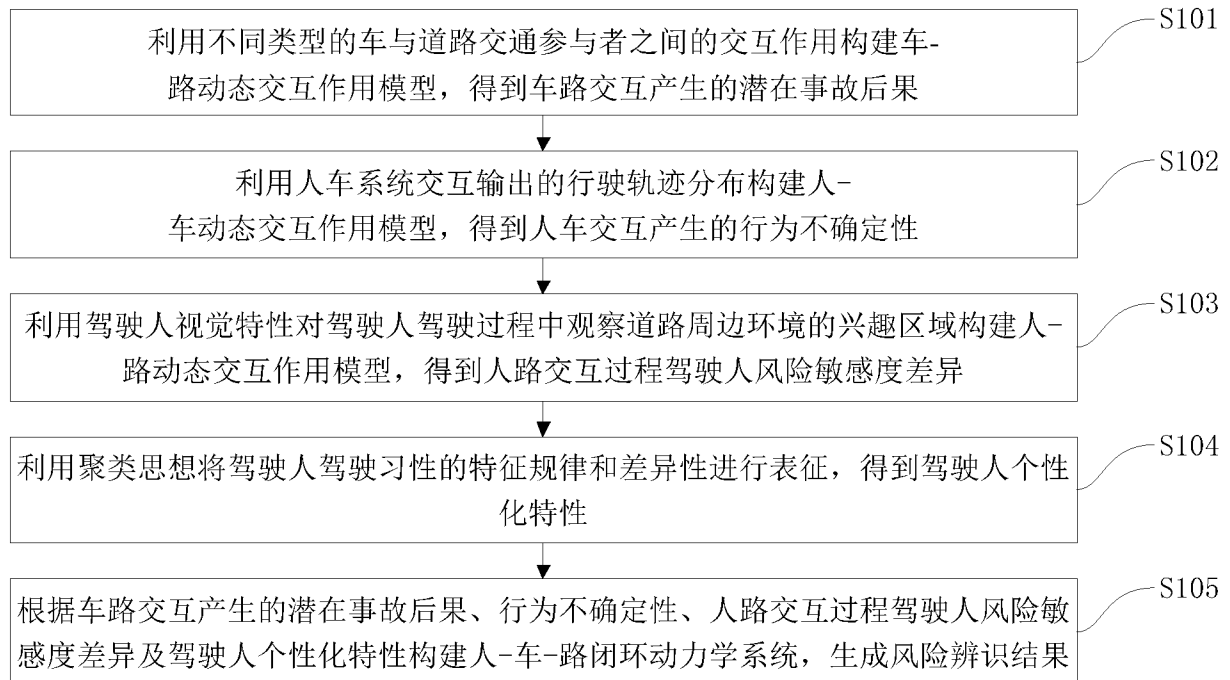


图 1

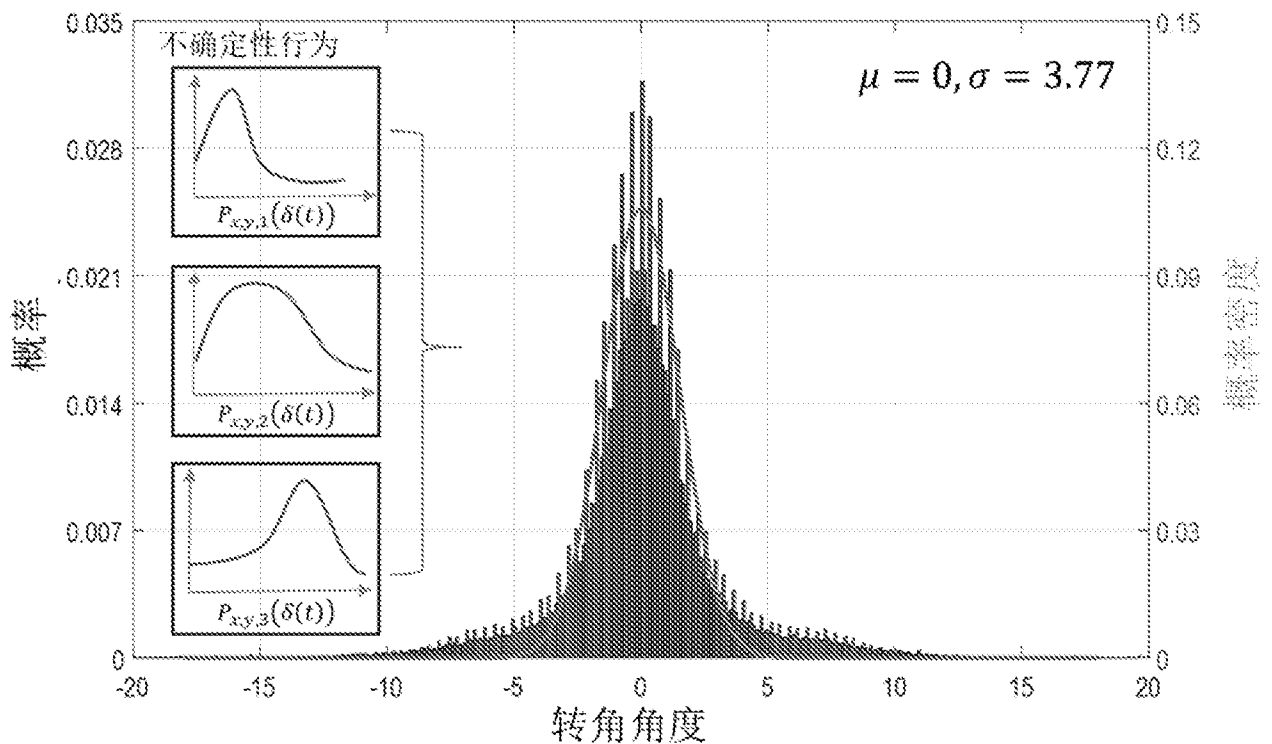


图 2

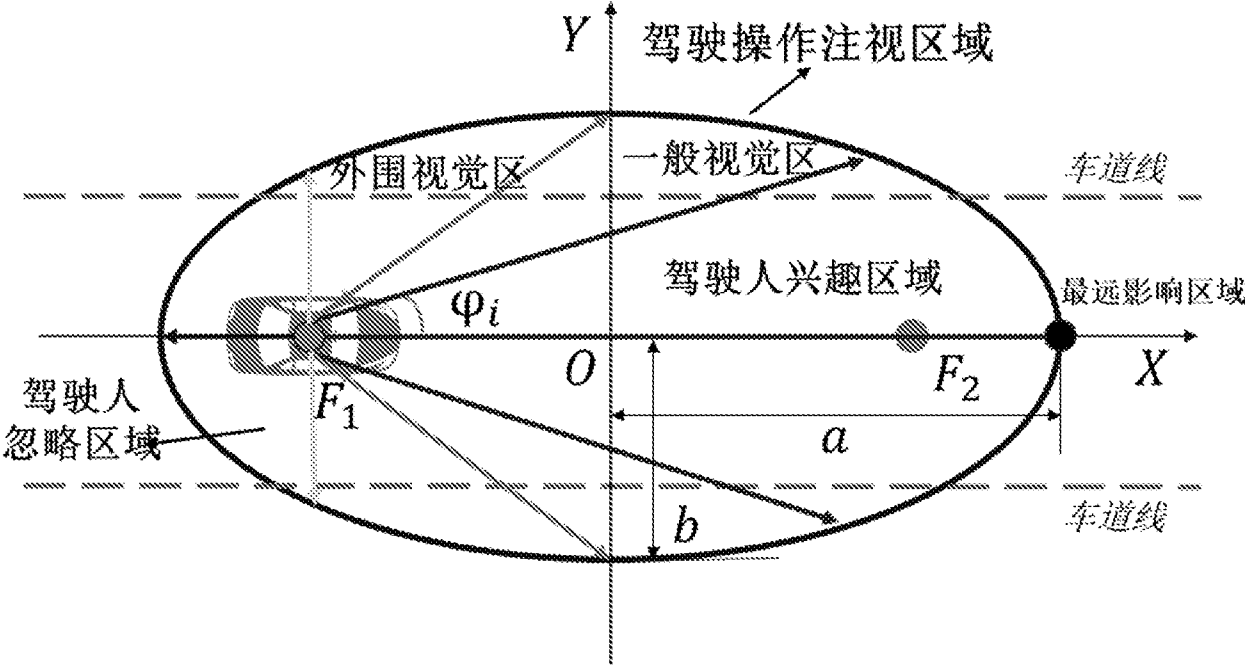


图 3

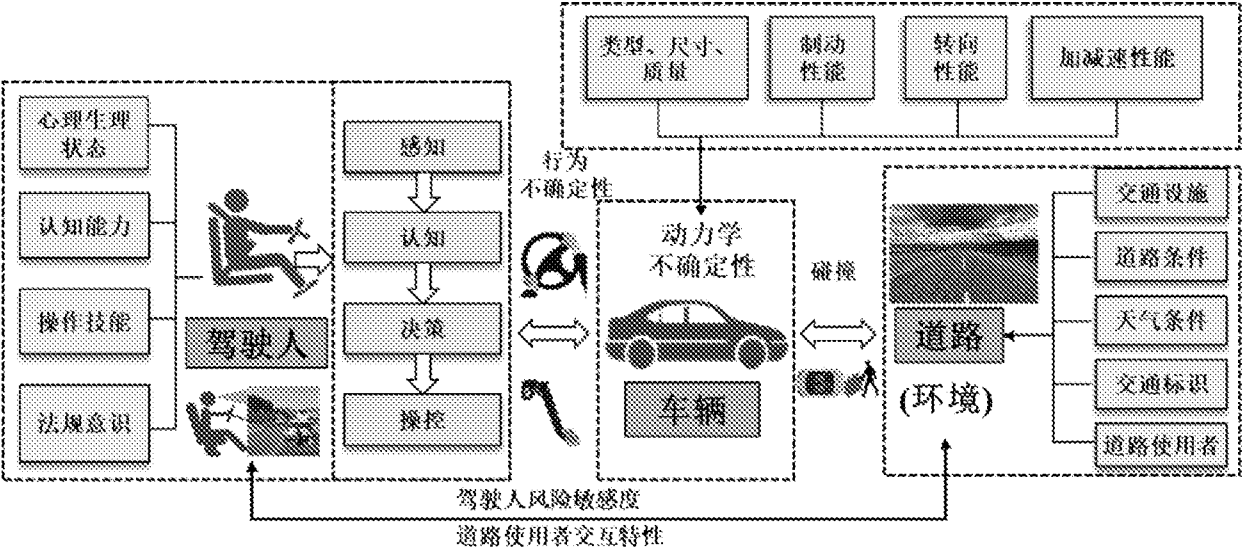


图 4

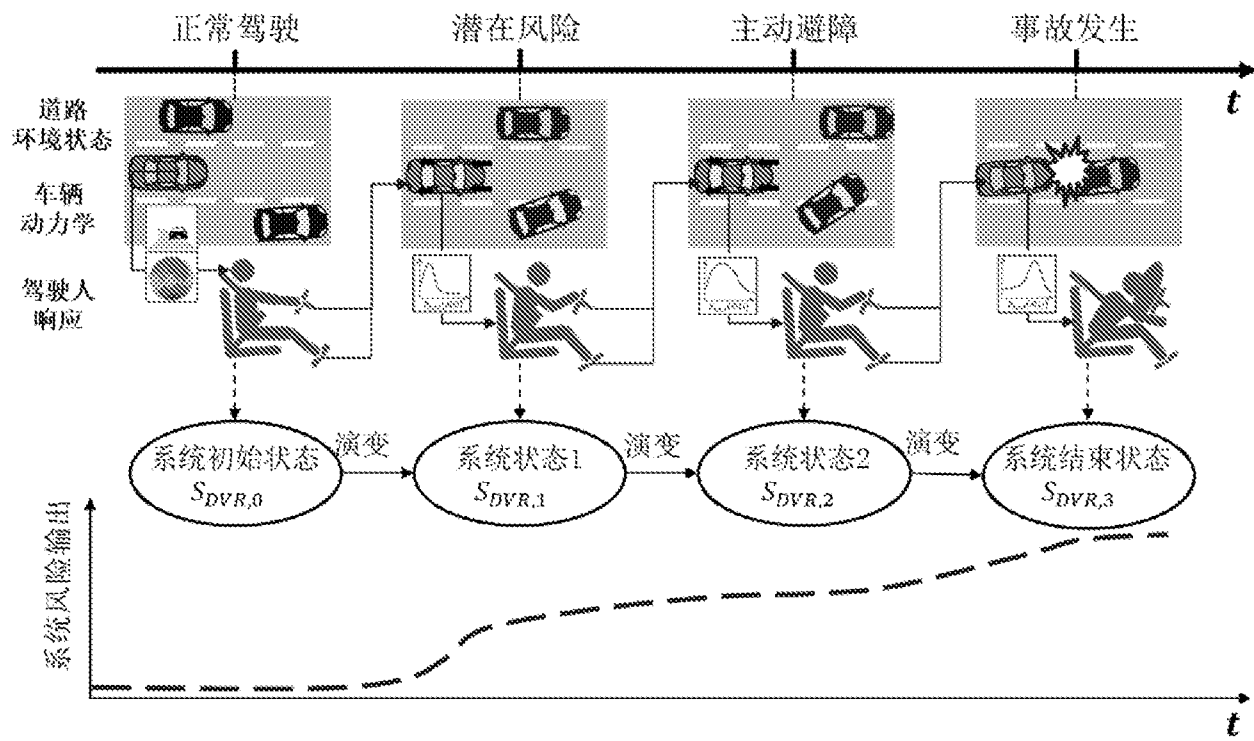


图 5

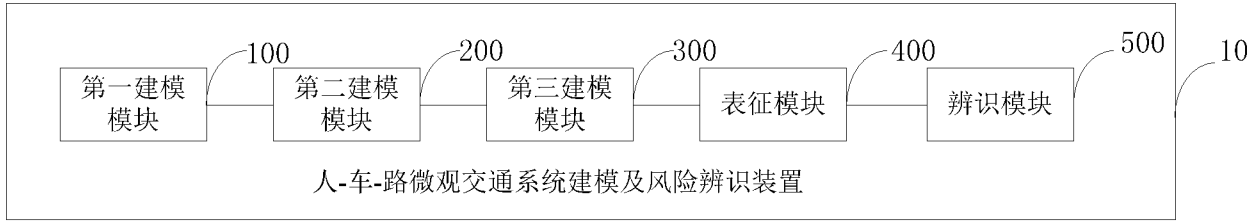


图 6

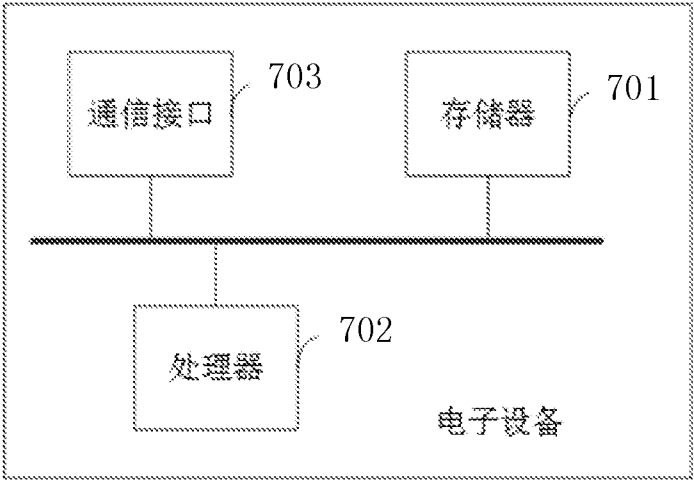


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/079109

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 30/20(2020.01)i; G06Q 10/06(2012.01)n; G06Q 50/30(2012.01)n; G06F 111/08(2020.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F; G06Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; CNKI; VEN; USTXT; WOTXT; EPTXT; IEEE; 百度学术, BAIDU SCHOLAR: 清华大学, 黄荷叶, 王健强, 杨奕彬, 刘艺璐, 崔明阳, 许庆, 李克强, 人, 车, 路, 驾驶员, 微观交通系统, 建模, 风险, 辨识, 事故, 轨迹, 动态交互, 视觉, 环境, 兴趣区域, 聚类, 驾驶习性, 驾驶习惯, 驾驶风格, human, car, vehicle, road, driver, micro, transportation, traffic, system, model+, risk, identification, accident, track, dynamic interaction, vision, environment, ROI, regions of interest, clustering, driving habit, driving style

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 113946943 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 18 January 2022 (2022-01-18) claims 1-10, and description, paragraphs [0046]-[0146], and figures 1-7	1-10
A	CN 111523822 A (CHONGQING UNIVERSITY OF ARTS AND SCIENCES) 11 August 2020 (2020-08-11) description, paragraphs [0021]-[0221]	1-10
A	CN 109740840 A (SHENZHEN DDICAR TECHNOLOGY CO., LTD.) 10 May 2019 (2019-05-10) entire document	1-10
A	CN 108648447 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 12 October 2018 (2018-10-12) entire document	1-10
A	US 2019100216 A1 (DENSO INTERNATIONAL AMERICA, INC. et al.) 04 April 2019 (2019-04-04) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

16 April 2022

Date of mailing of the international search report

25 April 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/079109

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	HUANG, Heye et al. "A probabilistic risk assessment framework considering lane-changing behavior interaction" <i>Science China(Information Sciences)</i> , Vol. 63, No. 09, 17 August 2020 (2020-08-17), ISSN: 1674-733X, 190203:1-190203:15	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/079109

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	113946943	A	18 January 2022	None			
CN	111523822	A	11 August 2020	WO	2021223458	A1	11 November 2021
CN	109740840	A	10 May 2019	None			
CN	108648447	A	12 October 2018	EP	3792893	A1	17 March 2021
				WO	2019213980	A1	14 November 2019
				EP	3792893	A4	30 June 2021
				CN	108648447	B	05 April 2019
US	2019100216	A1	04 April 2019	US	10300922	B2	28 May 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/079109

A. 主题的分类

G06F 30/20(2020.01)i; G06Q 10/06(2012.01)n; G06Q 50/30(2012.01)n; G06F 111/08(2020.01)n

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F; G06Q

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS;CNTXT;CNKI;VEN;USTXT;WOTXT;EPTXT;IEEE;百度学术;清华大学, 黄荷叶, 王建强, 杨奕彬, 刘艺璁, 崔明阳, 许庆, 李克强, 人, 车, 路, 驾驶员, 微观交通系统, 建模, 风险, 辨识, 事故, 轨迹, 动态交互, 视觉, 环境, 兴趣区域, 聚类, 驾驶习性, 驾驶习惯, 驾驶风格, human, car, vehicle, road, driver, micro, transportation, traffic, system, model+, risk, identification, accident, track, dynamic interaction, vision, environment, ROI, regions of interest, clustering, driving habit, driving style

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 113946943 A (清华大学) 2022年1月18日 (2022 - 01 - 18) 权利要求第1-10项, 说明书第[0046]-[0146]段, 附图1-7	1-10
A	CN 111523822 A (重庆文理学院) 2020年8月11日 (2020 - 08 - 11) 说明书第[0021]-[0221]段	1-10
A	CN 109740840 A (深圳市大东车慧科技股份有限公司) 2019年5月10日 (2019 - 05 - 10) 全文	1-10
A	CN 108648447 A (清华大学) 2018年10月12日 (2018 - 10 - 12) 全文	1-10
A	US 2019100216 A1 (DENS0 INT AMERICA INC 等) 2019年4月4日 (2019 - 04 - 04) 全文	1-10

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2022年4月16日

国际检索报告邮寄日期

2022年4月25日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

赵玉航

电话号码 (86-512) 88995879

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	Heye HUANG 等. "A probabilistic risk assessment framework considering lane-changing behavior interaction" Science China(Information Sciences), 第63卷, 第09期, 2020年8月17日 (2020 - 08 - 17), ISSN: 1674-733X, 190203:1-190203:15	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/079109

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	113946943	A	2022年1月18日	无			
CN	111523822	A	2020年8月11日	WO	2021223458	A1	2021年11月11日
CN	109740840	A	2019年5月10日	无			
CN	108648447	A	2018年10月12日	EP	3792893	A1	2021年3月17日
				WO	2019213980	A1	2019年11月14日
				EP	3792893	A4	2021年6月30日
				CN	108648447	B	2019年4月5日
US	2019100216	A1	2019年4月4日	US	10300922	B2	2019年5月28日