



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108860149 B

(45)授权公告日 2020.02.07

(21)申请号 201810642698.5

B60W 50/00(2006.01)

(22)申请日 2018.08.20

审查员 邢伟

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108860149 A

(43)申请公布日 2018.11.23

(73)专利权人 中原工学院

地址 451191 河南省郑州市新郑双湖经济  
技术开发区淮河路1号

(72)发明人 房泽平 常静 刘自范 杨益

赵启凤 贺焕林

(74)专利代理机构 郑州优盾知识产权代理有限

公司 41125

代理人 郑园 栗改

(51)Int.Cl.

B60W 30/18(2012.01)

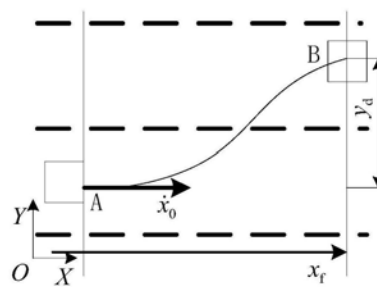
权利要求书4页 说明书10页 附图9页

## (54)发明名称

一种用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法

## (57)摘要

本发明提出了一种用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,步骤如下:将智能车辆时间最短自由变道运动轨迹设计问题转换为以时间最短为性能指标的最优控制问题;将时间最短自由变道运动最优控制问题转换为可求解的最优控制问题,寻找求解方法;利用数值方法求解最优控制问题,根据车辆纵向位置和横向位置得到时间最短自由变道的运动轨迹。本发明可以根据车辆配置的车辆状态感知装置获得车辆信息,实时地设计智能车辆自由运动的轨迹,得到的轨迹满足时间最短性能指标;可广泛用于多种车辆运动场景,有益于车道上车辆行驶和超车减少占用快速车道时间,使得其可以用于智能车辆更复杂的操作,如合流、双变道、驶入/驶出高速公路和超车。



1. 一种用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,其特征在于,其步骤如下:

步骤一:将智能车辆时间最短自由变道运动轨迹设计问题转换为以时间最短为性能指标的最优控制问题;

步骤二:将步骤一中时间最短自由变道运动最优控制问题转换为可求解的最优控制问题,寻找求解方法;

步骤三:利用数值方法求解步骤二中的最优控制问题,根据车辆纵向位置和横向位置得到时间最短自由变道的运动轨迹;

构建所述步骤一中以时间最短为性能指标的最优控制问题的方法为:建立智能三自由度的车辆运动动力学模型,分析车辆运动动力学模型中的非线性和不确定性参数;以自由变道运动时间为性能指标,结合车辆运动动力学模型和边界条件构建时间最短自由变道运动最优控制问题;

所述车辆运动动力学模型为简化单牵引自行车模型,具有纵向运动、横向运动和横摆运动3个自由度,具体为:

$$\begin{aligned} F_t \cos\psi - F_r \sin\psi - F_f \sin(\psi + \delta_f) &= M\ddot{x} \\ F_t \sin\psi + F_r \sin\psi + F_f \cos(\psi + \delta_f) &= M\ddot{y} \\ l_1 F_f \cos\delta_f - l_2 F_r &= I_z \ddot{\psi} \end{aligned} \quad (1);$$

式中: $M$ 为车辆的总质量; $V$ 为车辆纵向速度; $\beta$ 为车辆滑移角; $\psi$ 为车辆偏航角; $\delta_f$ 为前轮转向角; $I_z$ 为车辆垂直转动惯量; $F_t$ 为牵引力,取决于发动机转矩或制动力矩; $F_f$ 和 $F_r$ 分别表示前轮和后轮的轮胎侧向力; $l_1$ 和 $l_2$ 分别为车辆的质心到前轴和后轴的距离; $\psi$ 为车辆偏航角; $\ddot{x}$ 为车辆纵向运动加速度; $\ddot{y}$ 为车辆横向运动加速度; $\ddot{\psi}$ 为车辆偏航角加速度; $XOY$ 为地球坐标系; $xCGy$ 为车体坐标系, $C.G.$ 为车辆的质心;

在横向滑移角小于 $5^\circ$ 时,考虑线性轮胎模型,前轮和后轮的轮胎侧向力分别为:

$$\begin{aligned} F_r &= -C_r \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos\psi - \dot{x} \sin\psi}{\dot{x} \cos\psi + \dot{y} \sin\psi} \right) \right] \\ F_f &= -C_r \left[ \tan^{-1} \left( \frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos\psi - \dot{x} \sin\psi}{\dot{x} \cos\psi + \dot{y} \sin\psi} \right) - \delta_f \right] \end{aligned} \quad (2);$$

其中, $C_f$ 为前轮侧向刚度, $C_r$ 为前轮侧向刚度, $\dot{x}$ 为车辆纵向速度; $\dot{y}$ 为车辆横向速度; $\dot{\psi}$ 为车辆偏航角速度; $\delta_f$ 为前轮转向角。

2. 根据权利要求1所述的用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,其特征在于,所述构建时间最短自由变道运动最优控制问题的方法为:

定义状态向量: $\mathbf{x} = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ \psi \ \dot{\psi}]^T$ ,控制向量: $\mathbf{u} = [F_t \ \delta_f]^T$ ;

对于智能车辆时间最短最优变道运动控制问题,变道时间 $t_f$ 为目标函数,即:

$$J = \int_0^{t_f} 1 dt = t_f \quad (3);$$

车辆在整个变道过程受限于起点和终点处的车辆状态,自由变道最优控制问题为受起点和终点状态约束的以时间最短为优化指标的最优控制问题,表述为:

$$\min_{x,u(t)} J = \int_0^{t_f} 1 dt = t_f$$

s. t.

动态方程约束条件:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_1 \cos x_5 - F_r \sin x_5 - F_f \sin(x_5 + u_2)}{M} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{F_r \cos x_5 + u_1 \sin x_5 + F_f \cos(x_5 + u_2)}{M} \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= \frac{-l_2 F_r + l_1 F_f \cos u_2}{I_z} \end{aligned} \quad (4)$$

起点和终点状态约束条件:

$$\begin{aligned} x_1(0) &= 0, x_1(t_f) = x_f \\ x_2(0) &= \dot{x}_0, x_2(t_f) = \text{free} \\ x_3(0) &= 0, x_3(t_f) = y_d \\ x_4(0) &= 0, x_4(t_f) = 0 \\ x_5(0) &= 0, x_5(t_f) = 0 \\ x_6(0) &= 0, x_6(t_f) = 0 \end{aligned} \quad (5);$$

式中,起点时间为0,终点时间为 $t_f$ , $y_d$ 为相邻两车道线中心线间距离,free表示未指定; $I_z$ 为车辆垂直转动惯量; $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ 分别为车辆的纵向位置、纵向速度、横向位置、横向速度、偏航角、偏航角速度、牵引力、前轮转向角; $\dot{x}_1$ 、 $\dot{x}_2$ 、 $\dot{x}_3$ 、 $\dot{x}_4$ 、 $\dot{x}_5$ 、 $\dot{x}_6$ 分别为车辆的纵向速度、纵向加速度、横向速度、横向加速度、偏航角速度、偏航角加速度;

控制输入约束条件:

$$\begin{aligned} \delta_{f\min} &\leq u_2 \leq \delta_{f\max} \\ \left(\frac{u_1}{F_{x\max}}\right)^2 + \left(\frac{F_r}{F_{y\max}}\right)^2 &\leq 1 \\ u_1 &\leq u_{1\max} \\ F_r &= -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) \right] \\ F_r &= -C_r \left[ \tan^{-1} \left( \frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) - \delta_f \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $u_{1\max}$ 为最大牵引力, $\delta_{f\min}$ 、 $\delta_{f\max}$ 、 $F_{x\max}$ 、 $F_{y\max}$ 、 $u_{1\max}$ 分别为前轮转向角最小值、前轮转向角最大值、纵向牵引力最大值、横向牵引力最大值、牵引力最大值。

3. 根据权利要求1所述的用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,其特征在于,所述步骤二中针对变道运动模型的非线性和存在不确定性参数的问题,对不确定性参数在其参数空间进行近似,采用数值积分方法近似计算积分运算,将原自由变道运动最优控制问题转换为可以求解的最优控制问题。

4. 根据权利要求3所述的用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,其特征在于,考虑的不确定性参数为车辆质量M,智能车辆的时间最短的自由变道运动问题为含有不确定性参数的最优控制问题,将车辆质量M在其参数空间 $\Omega$ 上进行积分得到新的积分运算为:

$$J_{\text{new}} = \int_{\Omega} t_f dM \quad (7)$$

利用已有的求积原理可以求解式(7);

选定节点和权重 $(p_i, \omega_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ , 这里n为节点数量,得到新的目标函数:

$$J_{\text{new}} = \sum_{i=1}^n \omega_i J_{\text{new}}[x(\cdot, p_i), u(\cdot), t_f; p_i] + \text{Res}[J_{\text{new}}] \quad (8)$$

这里,  $\text{Res}[J_{\text{new}}]$ 为误差,  $\omega_i$ 是权重系数,  $p_i$ 参数节点;  $J_{\text{new}}$ 、 $x(\cdot, p_i)$ 、 $u(\cdot)$ 分别为目标值、 $p_i$ 节点的状态、控制量;

权重系数满足:  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ ,  $\text{Res}[1] = 0$ ;

根据式(8)选择两个节点和相应的权重系数 $(p_1, \omega_1)$ 、 $(p_2, \omega_2)$ ,可以得到含有不确定性参数的时间最短自由变道最优控制问题,具体描述为:

$$\min_{x, u(t)} J_{\text{new}} = \omega_1 t_f + \omega_2 t_f$$

s. t.

新的动态方程约束为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_1 \cos x_5 - F_r \sin x_5 - F_f \sin(x_5 + u_2)}{M} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{F_r \cos x_5 + u_1 \sin x_5 + F_f \cos(x_5 + u_2)}{M} \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= \frac{-l_2 F_r + l_1 F_f \cos u_2}{I_z} \\ \dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= \frac{u_1 \cos x_{11} - F_{r2} \sin x_{11} - F_{f2} \sin(x_{11} + u_2)}{M_2} \\ \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \frac{F_{r2} \cos x_{11} + u_1 \sin x_{11} + F_{f2} \cos(x_{11} + u_2)}{M_2} \\ \dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= \frac{-l_2 F_{r2} + l_1 F_{f2} \cos u_2}{I_{z2}} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,

$$F_r = -C_f [\tan^{-1}(\frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi})]$$

$$F_r = -C_r [\tan^{-1}(\frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi}) - \delta_f]$$

$$F_{r2} = -C_r [\tan^{-1}(\frac{-l_2 \dot{\psi} + x_{10} \cos \psi - x_8 \sin \psi}{x_8 \cos \psi + x_{10} \sin \psi})]$$

$$F_{r2} = -C_f [\tan^{-1}(\frac{l_1 \dot{\psi} + x_{10} \cos \psi - x_8 \sin \psi}{x_8 \cos \psi + x_{10} \sin \psi}) - u_2]$$

新的起点和终点的约束为

$$x_1(0) = x_7(0) = 0, x_1(t_f) = x_7(t_f) = x_f$$

$$x_2(0) = x_8(0) = \dot{x}_0, x_2(t_f) = x_8(t_f) = \text{free}$$

$$x_3(0) = x_9(0) = 0, x_3(t_f) = x_9(t_f) = y_d$$

$$x_4(0) = x_{10}(0) = 0, x_4(t_f) = x_{10}(t_f) = 0$$

$$x_5(0) = x_{11}(0) = 0, x_5(t_f) = x_{11}(t_f) = 0$$

$$x_6(0) = x_{12}(0) = 0, x_6(t_f) = x_{12}(t_f) = 0$$

控制约束与同原式 (6) :

$$\delta_{f \min} \leq u_2 \leq \delta_{f \max}$$

$$(\frac{u_1}{F_{x \max}})^2 + (\frac{F_r}{F_{y \max}})^2 \leq 1$$

$$u_1 \leq u_{1 \max}$$

$$F_r = -C_f [\tan^{-1}(\frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi})]$$

$$F_r = -C_r [\tan^{-1}(\frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi}) - \delta_f]$$

5. 根据权利要求1所述的用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法, 其特征在于, 所述步骤三中取车辆牵引力和前轮转向角为控制量, 分析车辆变道运动的纵向位置、纵向车速、横向位置、横向车速、偏航角和偏航角率的边界约束条件及控制量约束条件; 对不确定性参数在其参数空间进行近似, 采用数值积分方法近似计算积分运算, 将原时间最短自由变道运动最优控制问题转换为可以求解的最优控制问题; 求解后, 得到车辆纵向位置、纵向车速、横向位置、横向车速、偏航角、偏航角率和控制量的优化结果, 由车辆纵向位置和横向位置得到变道运动的轨迹。

## 一种用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及智能车辆变道运动轨迹设计的技术领域,尤其涉及一种用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,用于智能车辆以时间最短为性能指标的自由变道运动问题的求解。

### 背景技术

[0002] 根据车辆运动方向,将车辆的运动控制分为纵向运动控制和横向运动控制两种。车辆横向运动控制的主要任务是路径/车道线保持或保持车辆在道路/车道线上行驶。在结构化道路上行驶的车辆,车道变道操作是最为常用的操作之一。车辆的横向动力学系统是一个具有复杂非线性和不确定性的系统,横向运动控制容易受到诸如车辆重量、路面侧倾、轮胎特性、路面粗糙程度等因素的影响,加之横向运动过程中会受到侧向风力等大量外部干扰,导致系统参数发生摄动,因此,横向运动控制算法的研究应着重考虑解决这些问题。车道变换是深入研究的自动驾驶操作之一,可以用于智能车辆执行更复杂的操作,如合流、驶入/驶出高速公路或超车。

[0003] 变道轨迹设计和控制是变道运动的两个主要内容。传统变道轨迹设计方法包括图形搜索或基于几何的方法。在现有参考文献中,已经研究了车辆的自由变道轨迹,例如恒速偏移变道轨迹、圆弧变道轨迹、梯形加速变道轨迹、余弦函数变道轨迹、B样条曲线变道轨迹和多项式变道轨迹等。对曲线路面自动变道的研究是用外侧和内侧车道的非零曲率不等的方式进行的,有助于基于梯形加速度曲线的适用于弯道的轨迹规划方法;也有预先设计车道变化轨迹,并根据模型预测控制算法设计变道控制器,基于伪谱法设计了独立最优变道路径。总之,存在以下不足:已有文献中的变道轨迹具有特定几何特征并提前设计的给定数学表达式来描述,重点突出变道轨迹跟踪效果,不能根据车辆的状态实时设计变道轨迹;未考虑车辆模型不确定参数对变道轨迹设计的影响。

### 发明内容

[0004] 针对现有变道轨迹方法未考虑车辆模型不确定参数对变道轨迹设计的影响,不能根据车辆的状态实时设计变道轨迹的技术问题,本发明提出一种用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,得到自由变道运动轨迹具有时间最短、高实时性和强鲁棒性的特点,可用于更复杂的操作,如合流、双变道、驶入/驶出高速公路和超车。

[0005] 为了达到上述目的,本发明的技术方案是这样实现的:

[0006] 一种用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,其步骤如下:

[0007] 步骤一:将智能车辆时间最短自由变道运动轨迹设计问题转换为以时间最短为性能指标的最优控制问题;

[0008] 步骤二:将步骤一中时间最短自由变道运动最优控制问题转换为可求解的最优控制问题,寻找求解方法;

[0009] 步骤三:利用数值方法求解步骤二中的最优控制问题,根据车辆纵向位置和横向

位置得到时间最短自由变道的运动轨迹。

[0010] 构建所述步骤一中以时间最短为性能指标的最优控制问题的方法为:建立智能三自由度的车辆运动动力学模型,分析车辆运动动力学模型中的非线性和不确定性参数;以自由变道运动时间为性能指标,结合车辆运动动力学模型和边界条件构建时间最短自由变道运动最优控制问题。

[0011] 所述车辆运动动力学模型为简化单牵引自行车模型,具有纵向运动、横向运动和横摆运动3个自由度,具体为:

$$\begin{aligned} F_t \cos \psi - F_r \sin \psi - F_f \sin(\psi + \delta_f) &= M\ddot{x} \\ F_t \sin \psi + F_r \cos \psi + F_f \cos(\psi + \delta_f) &= M\ddot{y} \\ l_1 F_f \cos \delta_f - l_2 F_r &= I_z \ddot{\psi} \end{aligned} \quad (1);$$

[0013] 式中: $M$ 为车辆的总质量; $V$ 为车辆纵向速度; $\beta$ 为车辆滑移角; $\psi$ 为车辆偏航角; $\delta_f$ 为前轮转向角; $I_z$ 为车辆垂直转动惯量; $F_t$ 为牵引力,取决于发动机转矩或制动力矩; $F_f$ 和 $F_r$ 分别表示前轮和后轮的轮胎侧向力; $l_1$ 和 $l_2$ 分别为车辆的质心到前轴和后轴的距离; $\psi$ 为车辆偏航角; $\ddot{x}$ 为车辆纵向运动加速度; $\ddot{y}$ 为车辆横向运动加速度; $\ddot{\psi}$ 为车辆偏航角加速度; $XOY$ 为地球坐标系; $xCGy$ 为车体坐标系, $C.G.$ 为车辆的质心;

[0014] 在横向滑移角小于 $5^\circ$ 时,考虑线性轮胎模型,前轮和后轮的轮胎侧向力分别为:

$$\begin{aligned} F_r &= -C_r [\tan^{-1}(\frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi})] \\ F_f &= -C_f [\tan^{-1}(\frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi}) - \delta_f] \end{aligned} \quad (2);$$

[0016] 其中, $C_f$ 为前轮侧向刚度, $C_r$ 为前轮侧向刚度, $\dot{x}$ 为车辆纵向速度; $\dot{y}$ 为车辆横向速度; $\dot{\psi}$ 为车辆偏航角速度; $\delta_f$ 为前轮转向角。

[0017] 所述构建时间最短自由变道运动最优控制问题的方法为:

[0018] 定义状态向量: $\mathbf{x} = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ \psi \ \dot{\psi}]^T$ ,控制向量: $\mathbf{u} = [F_t \ \delta_f]^T$ ;

[0019] 对于智能车辆时间最短最优变道运动控制问题,变道时间 $t_f$ 为目标函数,即:

$$J = \int_0^{t_f} 1 dt = t_f \quad (3);$$

[0021] 车辆在整个变道过程受限于起点和终点处的车辆状态,自由变道最优控制问题为受起点和终点状态约束的以时间最短为优化指标的最优控制问题,表述为:

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}(t)} J = \int_0^{t_f} 1 dt = t_f$$

[0023] s. t.

[0024] 动态方程约束条件:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= \frac{u_1 \cos x_5 - F_r \sin x_5 - F_f \sin(x_5 + u_2)}{M} \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
[0025] \quad \dot{x}_4 &= \frac{F_r \cos x_5 + u_1 \sin x_5 + F_f \cos(x_5 + u_2)}{M} \\
\dot{x}_5 &= x_6 \\
\dot{x}_6 &= \frac{-l_2 F_r + l_1 F_f \cos u_2}{I_z}
\end{aligned} \tag{4}$$

[0026] 起点和终点状态约束条件：

$$\begin{aligned}
x_1(0) &= 0, x_1(t_f) = x_f \\
x_2(0) &= \dot{x}_0, x_2(t_f) = \text{free} \\
x_3(0) &= 0, x_3(t_f) = y_d
\end{aligned} \tag{5}$$

[0027]

$$\begin{aligned}
x_4(0) &= 0, x_4(t_f) = 0 \\
x_5(0) &= 0, x_5(t_f) = 0 \\
x_6(0) &= 0, x_6(t_f) = 0
\end{aligned}$$

[0028] 式中，起点时间为0，终点时间为 $t_f$ ， $y_d$ 为相邻两车道线中心线间距离，free表示未指定； $I_z$ 为车辆垂直转动惯量； $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ 分别为车辆的纵向位置、纵向速度、横向位置、横向速度、偏航角、偏航角速度、牵引力、前轮转向角； $\dot{x}_1$ 、 $\dot{x}_2$ 、 $\dot{x}_3$ 、 $\dot{x}_4$ 、 $\dot{x}_5$ 、 $\dot{x}_6$ 分别为车辆的纵向速度、纵向加速度、横向速度、横向加速度、偏航角速度、偏航角加速度；

[0029] 控制输入约束条件：

$$\begin{aligned}
\delta_{f\min} &\leq u_2 \leq \delta_{f\max} \\
\left(\frac{u_1}{F_{x\max}}\right)^2 + \left(\frac{F_r}{F_{y\max}}\right)^2 &\leq 1 \\
u_1 &\leq u_{1\max}
\end{aligned} \tag{6}$$

[0030]

$$\begin{aligned}
F_r &= -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) \right] \\
F_f &= -C_r \left[ \tan^{-1} \left( \frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) - \delta_f \right]
\end{aligned}$$

[0031] 式中： $u_{1\max}$ 为最大牵引力， $\delta_{f\min}$ 、 $\delta_{f\max}$ 、 $F_{x\max}$ 、 $F_{y\max}$ 、 $u_{1\max}$ 分别为前轮转向角最小值、前轮转向角最大值、纵向牵引力最大值、横向牵引力最大值、牵引力最大值。

[0032] 所述步骤二中针对变道运动模型的非线性和存在不确定性参数的问题，对不确定性参数在其参数空间进行近似，采用数值积分方法近似计算积分运算，将原自由变道运动最优控制问题转换为可以求解的最优控制问题。

[0033] 考虑的不确定性参数为车辆质量M，智能车辆的时间最短的自由变道运动问题为含有不确定性参数的最优控制问题，将车辆质量M在其参数空间 $\Omega$ 上进行积分得到新的积分运算为：



$$[0034] \quad J_{\text{new}} = \int_{\Omega} t_f dM \quad (7)$$

[0035] 利用已有的求积原理可以求解式(7)；

[0036] 选定节点和权重  $(p_i, \omega_i), i=1, \dots, n$ , 这里  $n$  为节点数量, 得到新的目标函数:

$$[0037] \quad J_{\text{new}} = \sum_{i=1}^n \omega_i J_{\text{new}}[x(\cdot, p_i), u(\cdot), t_f; p_i] + \text{Res}[J_{\text{new}}] \quad (8)$$

[0038] 这里,  $\text{Res}[J_{\text{new}}]$  为误差,  $\omega_i$  是权重系数,  $p_i$  参数节点;  $J_{\text{new}}, x(\cdot, p_i), u(\cdot)$  分别为目标值、 $p_i$  节点的状态、控制量;

[0039] 权重系数满足:  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \text{Res}[1] = 0$ ;

[0040] 根据式(8)选择两个节点和相应的权重系数  $(p_1, \omega_1), (p_2, \omega_2)$ , 可以得到含有不确定性参数的时间最短自由变道最优控制问题, 具体描述为:

$$[0041] \quad \min_{x, u(t)} J_{\text{new}} = \omega_1 t_f + \omega_2 t_f$$

[0042] s. t.

[0043] 新的动态方程约束为:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{u_1 \cos x_5 - F_r \sin x_5 - F_f \sin(x_5 + u_2)}{M}$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = \frac{F_r \cos x_5 + u_1 \sin x_5 + F_f \cos(x_5 + u_2)}{M}$$

$$\dot{x}_5 = x_6$$

$$\dot{x}_6 = \frac{-l_2 F_r + l_1 F_f \cos u_2}{I_z}$$

[0044]

$$\dot{x}_7 = x_8$$

$$\dot{x}_8 = \frac{u_1 \cos x_{11} - F_{r2} \sin x_{11} - F_{f2} \sin(x_{11} + u_2)}{M_2}$$

$$\dot{x}_9 = x_{10}$$

$$\dot{x}_{10} = \frac{F_{r2} \cos x_{11} + u_1 \sin x_{11} + F_{f2} \cos(x_{11} + u_2)}{M_2} \quad (9)$$

$$\dot{x}_{11} = x_{12}$$

$$\dot{x}_{12} = \frac{-l_2 F_{r2} + l_1 F_{f2} \cos u_2}{I_{z2}}$$

[0045] 其中,

$$[0046] \quad F_r = -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) \right]$$

$$[0047] \quad F_f = -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) - \delta_f \right]$$

$$[0048] \quad F_{r2} = -C_f [\tan^{-1}(\frac{-l_2 \dot{\psi} + x_{10} \cos \psi - x_8 \sin \psi}{x_8 \cos \psi + x_{10} \sin \psi})]$$

$$[0049] \quad F_{r2} = -C_f [\tan^{-1}(\frac{l_1 \dot{\psi} + x_{10} \cos \psi - x_8 \sin \psi}{x_8 \cos \psi + x_{10} \sin \psi}) - u_2]$$

[0050] 新的起点和终点的约束为

$$[0051] \quad x_1(0) = x_7(0) = 0, x_1(t_f) = x_7(t_f) = x_f$$

$$[0052] \quad x_2(0) = x_8(0) = \dot{x}_0, x_2(t_f) = x_8(t_f) = \text{free}$$

$$[0053] \quad x_3(0) = x_9(0) = 0, x_3(t_f) = x_9(t_f) = y_d$$

$$[0054] \quad x_4(0) = x_{10}(0) = 0, x_4(t_f) = x_{10}(t_f) = 0$$

$$[0055] \quad x_5(0) = x_{11}(0) = 0, x_5(t_f) = x_{11}(t_f) = 0$$

$$[0056] \quad x_6(0) = x_{12}(0) = 0, x_6(t_f) = x_{12}(t_f) = 0$$

[0057] 控制约束与同原式(6)：

$$\delta_{f \min} \leq u_2 \leq \delta_{f \max}$$

$$(\frac{u_1}{F_{x \max}})^2 + (\frac{F_r}{F_{y \max}})^2 \leq 1$$

$$[0058] \quad u_1 \leq u_{1 \max}$$

$$F_r = -C_f [\tan^{-1}(\frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi})]$$

$$F_f = -C_r [\tan^{-1}(\frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi}) - \delta_f]$$

[0059] 所述步骤三中取车辆牵引力和前轮转向角为控制量,分析车辆变道运动的纵向位置、纵向车速、横向位置、横向车速、偏航角和偏航角率的边界约束条件及控制量约束条件;对不确定性参数在其参数空间进行近似,采用数值积分方法近似计算积分运算,将原时间最短自由变道运动最优控制问题转换为可以求解的最优控制问题;求解后,得到车辆纵向位置、纵向车速、横向位置、横向车速、偏航角、偏航角率和控制量的优化结果,由车辆纵向位置和横向位置得到变道运动的轨迹。

[0060] 本发明的有益效果:将智能车辆时间最短的自由换道运动轨迹设计问题转换最优控制问题,将最优控制问题的优化结果作为变道轨迹;针对车辆运动动力学模型中的非线性和不确定性参数,采用参数空间近似和数值积分的方法转换原时间最短的自由变道最优控制问题;智能车辆自主行驶中,最小化变道时间有益于车道上车辆行驶和为超车减少占用快速道或对面车道的的时间。本发明可以根据车辆配置的车辆状态感知装置获得车辆信息,实时地设计智能车辆自由运动的轨迹,得到的轨迹满足时间最短性能指标;车辆变道运动可广泛用于多种车辆运动场景,时间最短自由变道运动有益于车道上车辆行驶和超车减少占用快速车道时间,使得其可以用于智能车辆更复杂的操作,如合流、双变道、驶入/驶出高速公路和超车。

## 附图说明

[0061] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现

有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0062] 图1是本发明时间最短自由变道运动示意图。

[0063] 图2是本发明二轮自行车动力学模型的结构图。

[0064] 图3是本发明的车载乘客的数量固定时的优化结果图。

[0065] 图4是本发明的车载乘客的数量变化时的优化结果图。

### 具体实施方式

[0066] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有付出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0067] 一种用于智能车辆时间最短自由变道的运动轨迹设计方法,可以根据车辆配置的车辆状态感知装置获得的车辆信息,实时地设计智能车辆自由变道运动轨迹,得到的轨迹满足时间最短性能指标,主要包括以下三个部分:

[0068] 步骤一:将智能车辆时间最短自由变道运动轨迹设计问题转换为以时间最短为性能指标的最优控制问题。

[0069] 建立智能车辆三自由度运动动力学模型,分析车辆运动模型中的非线性和不确定性参数。以自由变道运动时间为性能指标,结合车辆运动动力学模型和边界条件构建时间最短自由变道运动最优控制问题。

[0070] 根据智能车辆行驶要求,其需要变换到相邻车道继续行驶(单变道)或超车(双变道)。最小化变道时间有益于车道上车辆行驶和为超车减少占用快速道或对面车道的的时间。如图1,假设车辆由点A到点B变道过程中完成的纵向行驶距离 $x_f$ 和横向行驶距离 $y_d$ ,以最短时间完成变道行驶。

[0071] 车辆动力学模型为简单牵引自行车模型,如图2,C.G.为车辆的质心;XOY为地球坐标系; $xCGy$ 为车体坐标系。该模型具有纵向运动、横向运动和横摆运动3个自由度。车辆运动模型为:

$$\begin{aligned}
 F_t \cos\psi - F_r \sin\psi - F_f \sin(\psi + \delta_f) &= M\ddot{x} \\
 F_t \sin\psi + F_r \sin\psi + F_f \cos(\psi + \delta_f) &= M\ddot{y} \\
 l_1 F_f \cos\delta_f - l_2 F_r &= I_z \ddot{\psi}
 \end{aligned} \tag{1}$$

[0073] 式中: $M$ 为车辆的总质量; $V$ 为车辆纵向速度; $\beta$ 为车辆滑移角; $\psi$ 为车辆偏航角; $\delta_f$ 为前轮转向角; $I_z$ 为车辆垂直转动惯量; $F_t$ 为牵引力,取决于发动机转矩或制动力矩; $F_f$ 和 $F_r$ 分别表示前轮和后轮的轮胎侧向力; $l_1$ 和 $l_2$ 分别为车辆的质心到前轴和后轴的距离。 $\psi$ 为车辆偏航角; $\ddot{x}$ 为车辆纵向运动加速度; $\ddot{y}$ 为车辆横向运动加速度; $\ddot{\psi}$ 为车辆偏航角加速度。

[0074] 在较小横向滑移角(小于 $5^\circ$ )时,考虑线性轮胎模型,前轮和后轮的轮胎侧向力分别为:

$$\begin{aligned}
 [0075] \quad F_r &= -C_f [\tan^{-1}(\frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi})] \\
 F_f &= -C_r [\tan^{-1}(\frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi}) - \delta_f]
 \end{aligned} \tag{2};$$

[0076] 其中,  $C_f$  为前轮侧向刚度,  $C_r$  为前轮侧向刚度,  $\dot{x}$  为车辆纵向速度;  $\dot{y}$  为车辆横向速度;  $\dot{\psi}$  为车辆偏航角速度;  $\delta_f$  为前轮转向角。

[0077] 定义状态向量:  $\mathbf{x} = [x \dot{x} y \dot{y} \psi \dot{\psi}]^T$ , 控制向量:  $\mathbf{u} = [F_t \delta_f]^T$ 。

[0078] 车辆模型建模过程表明: 式 (1) 和式 (2) 中的车辆总质量  $M$ 、车辆垂直转动惯量  $I_z$ 、前轮侧向刚度  $C_f$ 、前轮侧向刚度  $C_r$  随车辆的载重变化而变化。对于车辆的横向运动控制, 通常将纵向车速  $V$  为定值, 而实际上, 纵向车速  $V$  也是变化的。这些参数定义为不确定性参数。模型中的不确定性参数以定值化处理, 可以简化系统设计, 但不符合实际要求。

[0079] 对于智能车辆时间最短最优变道运动控制问题, 变道时间  $t_f$  为目标函数, 即:

$$[0080] \quad J = \int_0^{t_f} 1 dt = t_f \tag{3}。$$

[0081] 参照图 1, 车辆由点 A 变道至点 B, 点 A 为起点, 点 B 为终点。整个变道过程受限于点 A 和点 B 处的车辆状态, 因此, 自由变道最优控制问题为受起点和终点状态约束的以时间最短为优化指标的最优控制问题, 表述为:

$$\begin{aligned}
 [0082] \quad \min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}(t)} J &= \int_0^{t_f} 1 dt = t_f \\
 [0083] \quad \text{s. t.} & \\
 [0084] \quad \text{动态方程约束条件:} & \\
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= \frac{u_1 \cos x_5 - F_r \sin x_5 - F_f \sin(x_5 + u_2)}{M} \\
 \dot{x}_3 &= x_4 \\
 [0085] \quad \dot{x}_4 &= \frac{F_r \cos x_5 + u_1 \sin x_5 + F_f \cos(x_5 + u_2)}{M} \\
 \dot{x}_5 &= x_6 \\
 \dot{x}_6 &= \frac{-l_2 F_r + l_1 F_f \cos u_2}{I_z}
 \end{aligned} \tag{4}$$

[0086] 起点和终点状态约束条件:

$$\begin{aligned}
 [0087] \quad x_1(0) &= 0, x_1(t_f) = x_f \\
 x_2(0) &= \dot{x}_0, x_2(t_f) = \text{free} \\
 x_3(0) &= 0, x_3(t_f) = y_d
 \end{aligned} \tag{5};$$

$$[0088] \quad x_4(0) = 0, x_4(t_f) = 0$$

$$[0089] \quad x_5(0) = 0, x_5(t_f) = 0$$

$$[0090] \quad x_6(0) = 0, x_6(t_f) = 0$$

[0091] 式中, 起点时间为 0, 终点时间为  $t_f$ ,  $y_d$  为相邻两车道线中心线间距离, free 表示未指定。  $I_z$  为车辆垂直转动惯量;  $x_1$ - $x_6$ 、 $u_1$ 、 $u_2$  分别为车辆的纵向位置、纵向速度、横向位置、横

向速度、偏航角、偏航角速度、牵引力、前轮转向角。 $\dot{x}_1$ 、 $\dot{x}_2$ 、 $\dot{x}_3$ 、 $\dot{x}_4$ 、 $\dot{x}_5$ 、 $\dot{x}_6$ 分别为车辆纵向速度、纵向加速度、横向速度、横向加速度、偏航角速度、偏航角加速度。

[0092] 控制输入约束条件:

$$\begin{aligned} \delta_{f\min} &\leq u_2 \leq \delta_{f\max} \\ \left(\frac{u_1}{F_{x\max}}\right)^2 + \left(\frac{F_r}{F_{y\max}}\right)^2 &\leq 1 \\ u_1 &\leq u_{1\max} \end{aligned} \quad (6)$$

[0093]

$$\begin{aligned} F_r &= -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) \right] \\ F_r &= -C_r \left[ \tan^{-1} \left( \frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) - \delta_f \right] \end{aligned}$$

[0094] 式中: $u_{1\max}$ 为最大牵引力。 $\delta_{f\min}$ 、 $\delta_{f\max}$ 、 $F_{x\max}$ 、 $F_{y\max}$ 、 $u_{1\max}$ 分别为前轮转向角最小值、前轮转向角最大值、纵向牵引力最大值、横向牵引力最大值、牵引力最大值。

[0095] 步骤二:将步骤一中时间最短自由变道运动最优控制问题转换为可求解的最优控制问题,寻找求解方法。

[0096] 针对变道运动模型的非线性和存在不确定性参数的问题,对不确定性参数在其参数空间进行近似,采用数值积分方法近似计算积分运算,将原自由变道运动最优控制问题转换为可以求解的最优控制问题。

[0097] 式(4)中存在不确定性参数,本发明考虑的不确定性参数为车辆质量M。这样,智能车辆的时间最短的自由变道运动问题为含有不确定性参数的最优控制问题,针对这个最优控制问题,本发明给出了以下求解方法。

[0098] 对式(3)中的车辆质量M在其参数空间 $\Omega$ 上进行积分,得到新的积分运算为:

$$J_{\text{new}} = \int_{\Omega} t_f dM \quad (7)$$

[0100] 利用已有的求积原理可以求解式(7)。选定节点和权重 $(p_i, \omega_i)$ , $i=1, \dots, n$ ,这里n为节点数量,这样,可以得到新的目标函数:

$$J_{\text{new}} = \sum_{i=1}^n \omega_i J_{\text{new}} [x(\cdot, p_i), u(\cdot, t_f; p_i)] + \text{Res}[J_{\text{new}}] \quad (8)$$

[0102] 这里, $\text{Res}[J_{\text{new}}]$ 为误差, $\omega_i$ 是权重系数, $p_i$ 参数节点。另外, $J_{\text{new}}[1] = 1$ 。 $J_{\text{new}}$ 、 $x(\cdot, p_i)$ 、 $u(\cdot)$ 分别为目标值、 $p_i$ 节点的状态、控制量。

[0103] 因此,权重系数满足:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \quad \text{Res}[1] = 0$$

[0105] 这样,根据式(8)选择两个节点和相应的权重系数 $(p_1, \omega_1)$ 、 $(p_2, \omega_2)$ ,可以得到含有不确定性参数的时间最短自由变道最优控制问题,具体描述为:

$$[0106] \quad \min_{x, u(t)} J_{\text{new}} = \omega_1 t_f + \omega_2 t_f$$

[0107] s. t.

[0108] 新的动态方程约束为:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_1 \cos x_5 - F_r \sin x_5 - F_f \sin(x_5 + u_2)}{M} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{F_r \cos x_5 + u_1 \sin x_5 + F_f \cos(x_5 + u_2)}{M} \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= \frac{-l_2 F_r + l_1 F_f \cos u_2}{I_z}\end{aligned}$$

[0109]

$$\begin{aligned}\dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= \frac{u_1 \cos x_{11} - F_{r2} \sin x_{11} - F_{f2} \sin(x_{11} + u_2)}{M_2} \\ \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \frac{F_{r2} \cos x_{11} + u_1 \sin x_{11} + F_{f2} \cos(x_{11} + u_2)}{M_2} \\ \dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= \frac{-l_2 F_{r2} + l_1 F_{f2} \cos u_2}{I_{z2}}\end{aligned}\tag{9}$$

[0110] 其中,

$$[0111] \quad F_r = -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) \right]$$

$$[0112] \quad F_f = -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) - \delta_f \right]$$

$$[0113] \quad F_{r2} = -C_r \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-l_2 \dot{\psi} + x_{10} \cos \psi - x_8 \sin \psi}{x_8 \cos \psi + x_{10} \sin \psi} \right) \right]$$

$$[0114] \quad F_{f2} = -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{l_1 \dot{\psi} + x_{10} \cos \psi - x_8 \sin \psi}{x_8 \cos \psi + x_{10} \sin \psi} \right) - u_2 \right]$$

[0115] 新的起点和终点的约束为

$$[0116] \quad x_1(0) = x_7(0) = 0, x_1(t_f) = x_7(t_f) = x_f$$

$$[0117] \quad x_2(0) = x_8(0) = \dot{x}_0, x_2(t_f) = x_8(t_f) = \text{free}$$

$$[0118] \quad x_3(0) = x_9(0) = 0, x_3(t_f) = x_9(t_f) = y_d$$

$$[0119] \quad x_4(0) = x_{10}(0) = 0, x_4(t_f) = x_{10}(t_f) = 0$$

$$[0120] \quad x_5(0) = x_{11}(0) = 0, x_5(t_f) = x_{11}(t_f) = 0$$

$$[0121] \quad x_6(0) = x_{12}(0) = 0, x_6(t_f) = x_{12}(t_f) = 0$$

[0122] 控制约束与同原式(6):

$$\begin{aligned} \delta_{f\min} \leq u_2 \leq \delta_{f\max} \\ \left(\frac{u_1}{F_{x\max}}\right)^2 + \left(\frac{F_r}{F_{y\max}}\right)^2 \leq 1 \\ [0123] \quad u_1 \leq u_{1\max} \\ F_r = -C_f \left[ \tan^{-1} \left( \frac{-l_2 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) \right] \\ F_f = -C_r \left[ \tan^{-1} \left( \frac{l_1 \dot{\psi} + \dot{y} \cos \psi - \dot{x} \sin \psi}{\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi} \right) - \delta_f \right] \end{aligned}$$

[0124] 步骤三:利用数值方法求解步骤二中的最优控制问题,根据车辆纵向位置和横向位置得到时间最短自由变道的运动轨迹。

[0125] 取车辆牵引力和前轮转向角为控制量,分析车辆变道运动的纵向位置、纵向车速、横向位置、横向车速、偏航角和偏航角率的边界约束条件及控制量约束条件,对不确定性参数在其参数空间进行近似,采用数值积分方法近似计算积分运算,将原时间最短自由变道运动最优控制问题转换为可以求解的最优控制问题。求解后,得到车辆纵向位置、纵向车速、横向位置、横向车速、偏航角、偏航角率和控制量的优化结果。由车辆纵向位置和横向位置得到变道运动的轨迹。

[0126] 本发明中,不确定性参数仅考虑车辆质量M。由于车辆转动惯量 $I_z$ 与车辆质量M有关,故其随车辆质量M变化而变化。假定成人乘客的体重为65~85kg,车载乘客数量从0位到4位变化时,车辆质量M为800~1060kg,相应的车辆转动惯量 $I_z$ 为1600~2120kg·m。 $l_1$ 和 $l_2$ 分别为1.6m和1.4m。 $C_f$ 和 $C_r$ 分别为35000rad/N和32000rad/N。 $F_{x\max}$ 和 $F_{y\max}$ 分别为6000N和5000N。 $\delta_{f\max}$ 和 $\delta_{f\min}$ 分别为 $10^\circ$ 和 $-10^\circ$ 。利用已有的数值方法(如伪谱法、直接法和间接法)求解含有不确定性参数的时间最短自由变道运动控制问题,得到以下优化结果。其中,车辆的纵向位置和横向位置作为车辆变道的运动轨迹。

[0127] 车载乘客的数量固定时,即分别承载1位、2位、3位和4位乘客,得到的优化结果,如图3所示。图3(a)为纵向位置优化结果,图3(b)为横向位置优化结果,图3(c)为纵向车速优化结果,图3(d)为横向速度优化结果,图3(e)为车辆自由变道轨迹,图3(f)为前轮转角优化结果。由图3(b)所示可以看出,四种乘客数量的最短变道时间分别为2.22s、2.40s、2.46s、2.52s。

[0128] 车载乘客的数量变化时,即分别为1-2、1-3、1-4位乘客,得到的优化结果,如图4所示。图4(a)为纵向位置优化结果,图4(b)为横向位置优化结果,图4(c)为纵向车速优化结果,图4(d)为横向速度优化结果,图4(e)为车辆自由变道轨迹,图4(f)为前轮转角优化结果。由图4(b)所示可以看出,三种变化乘客数量的最短变道时间分别为2.68s、2.65s、2.37s。

[0129] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

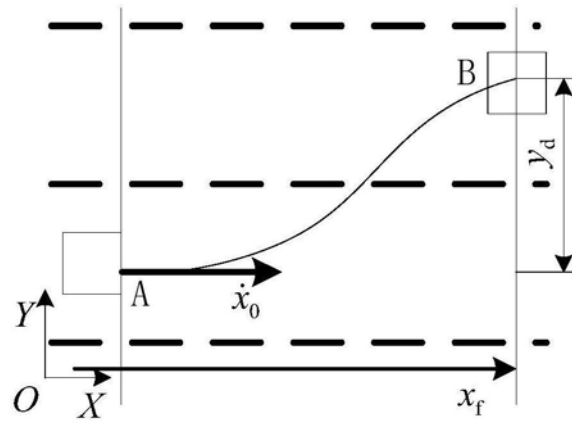


图1

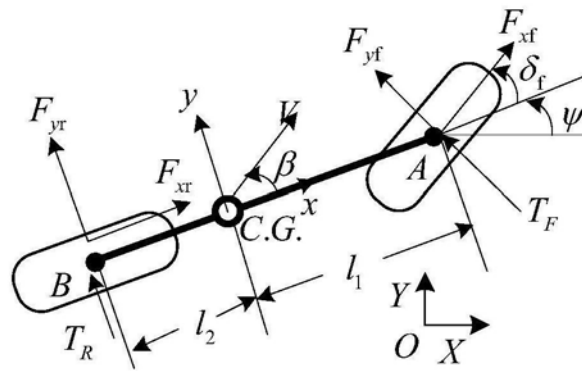
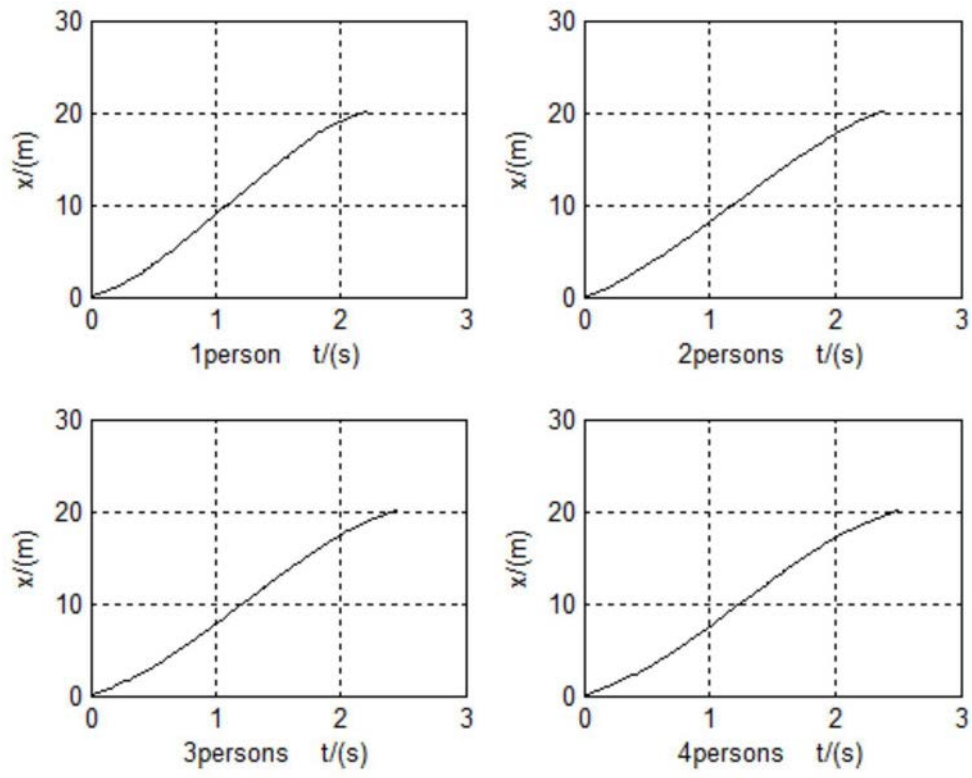
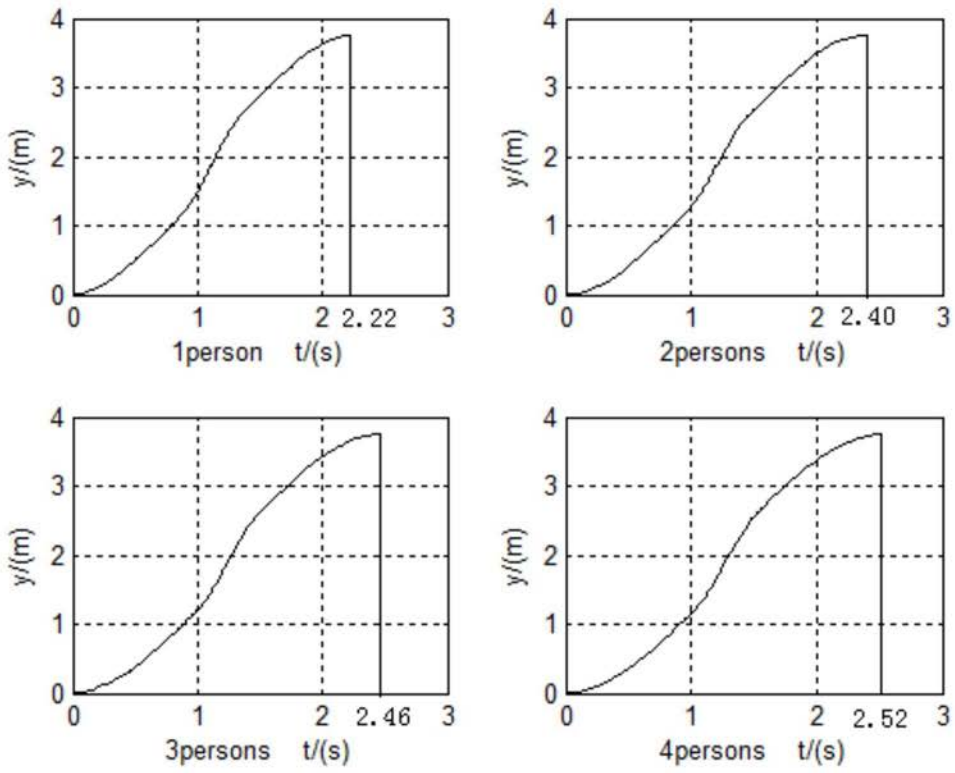


图2

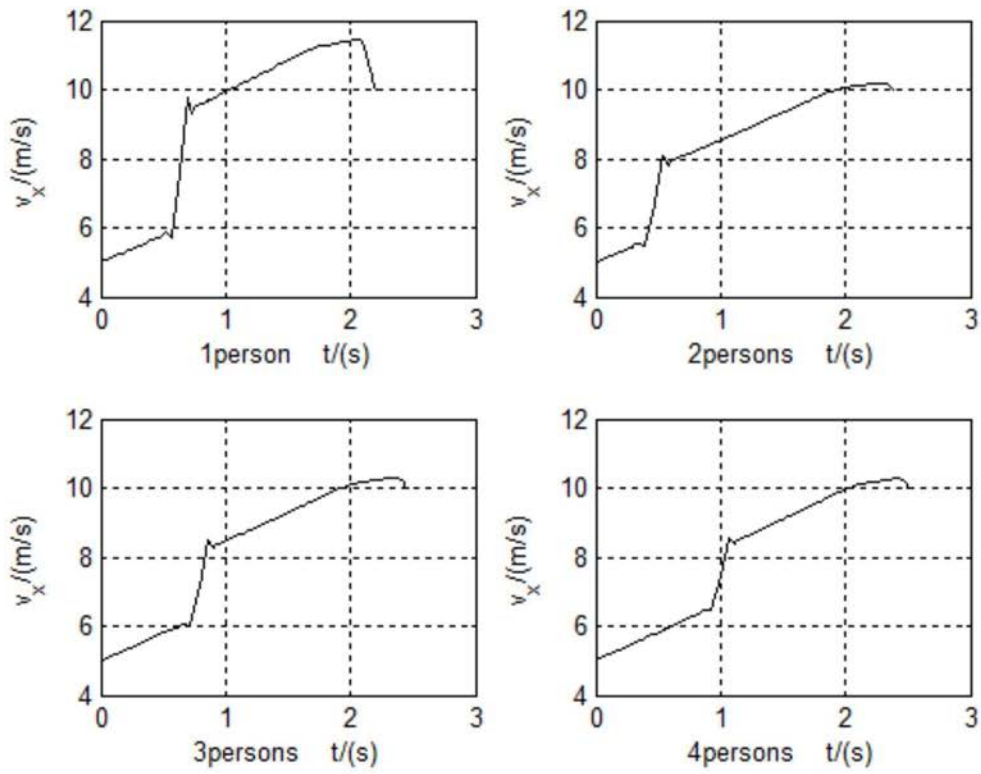




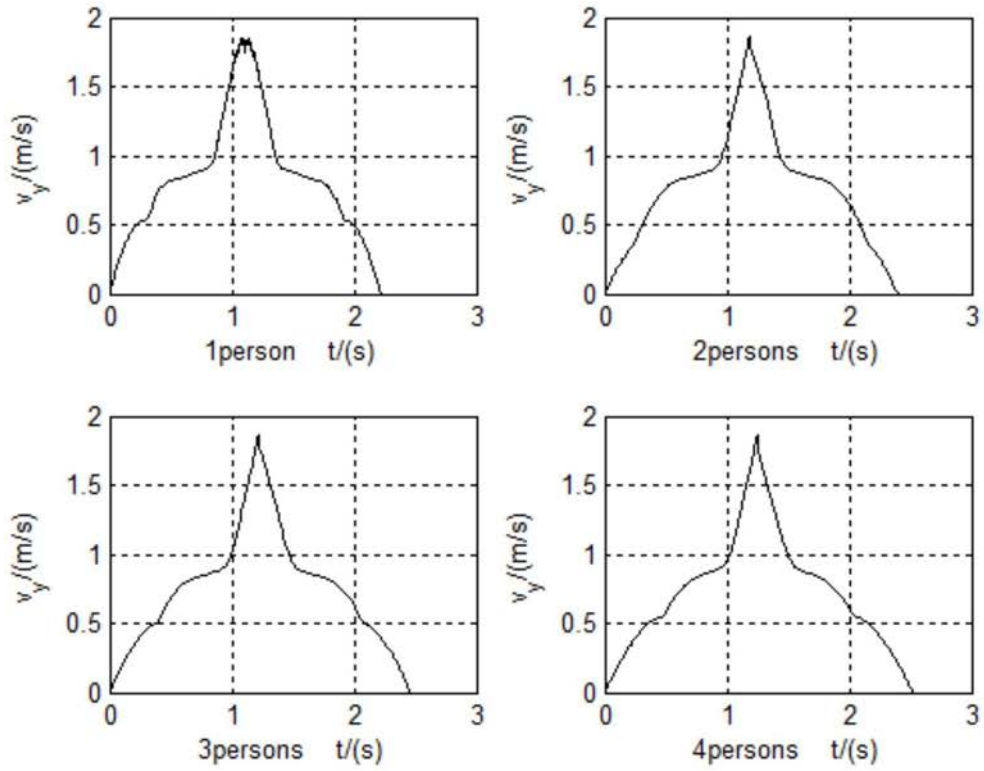
(a)



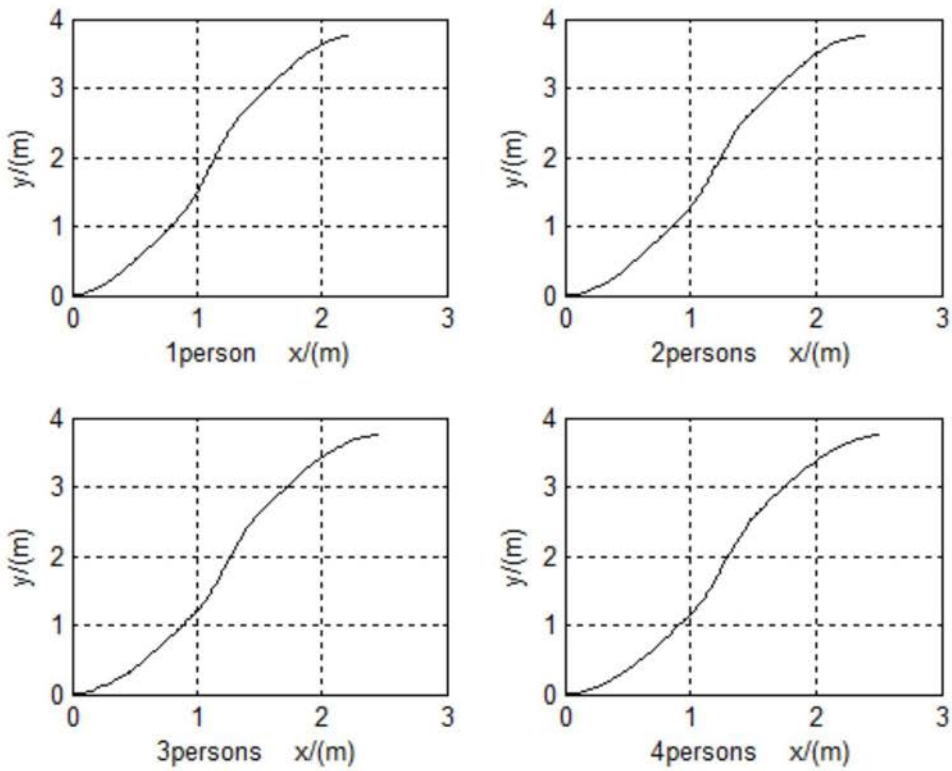
(b)



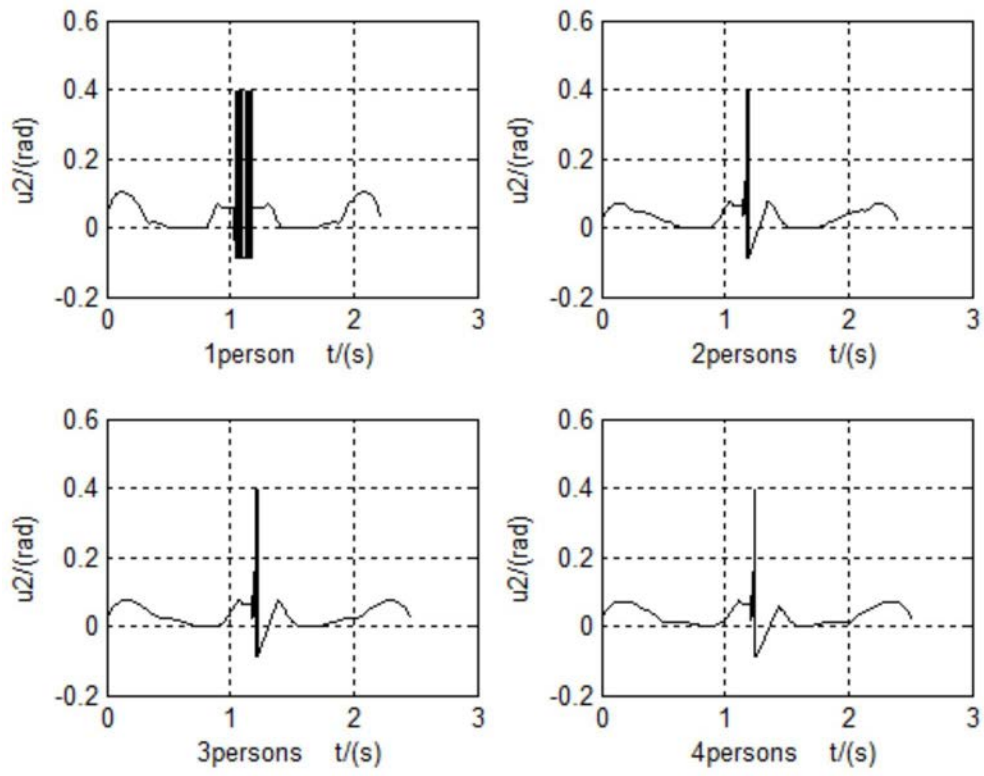
(c)



(d)

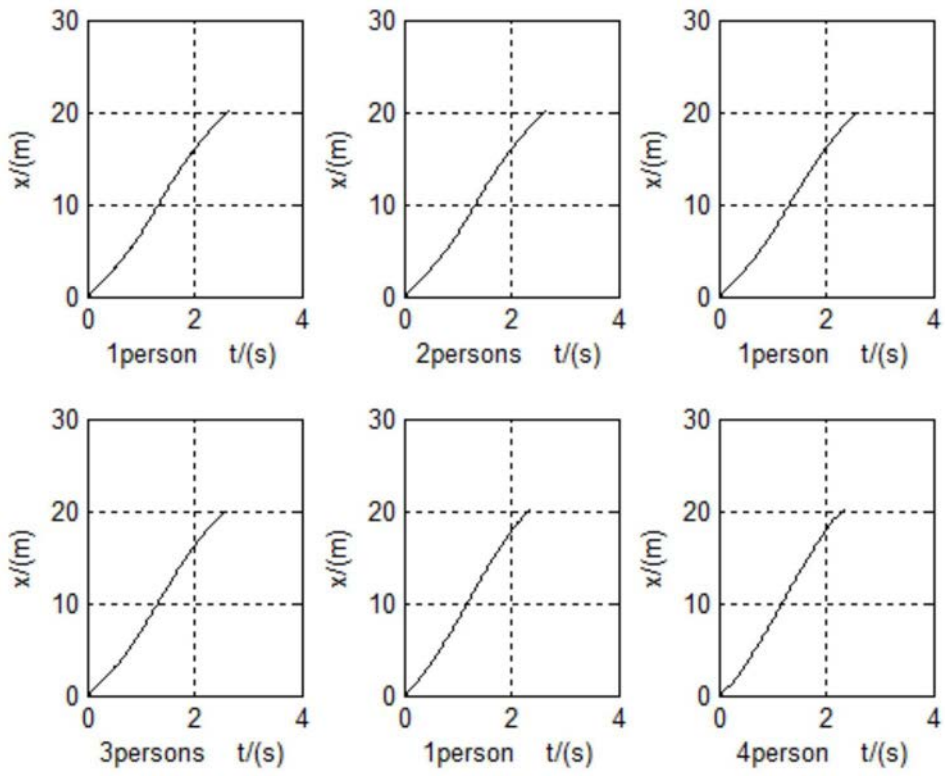


(e)

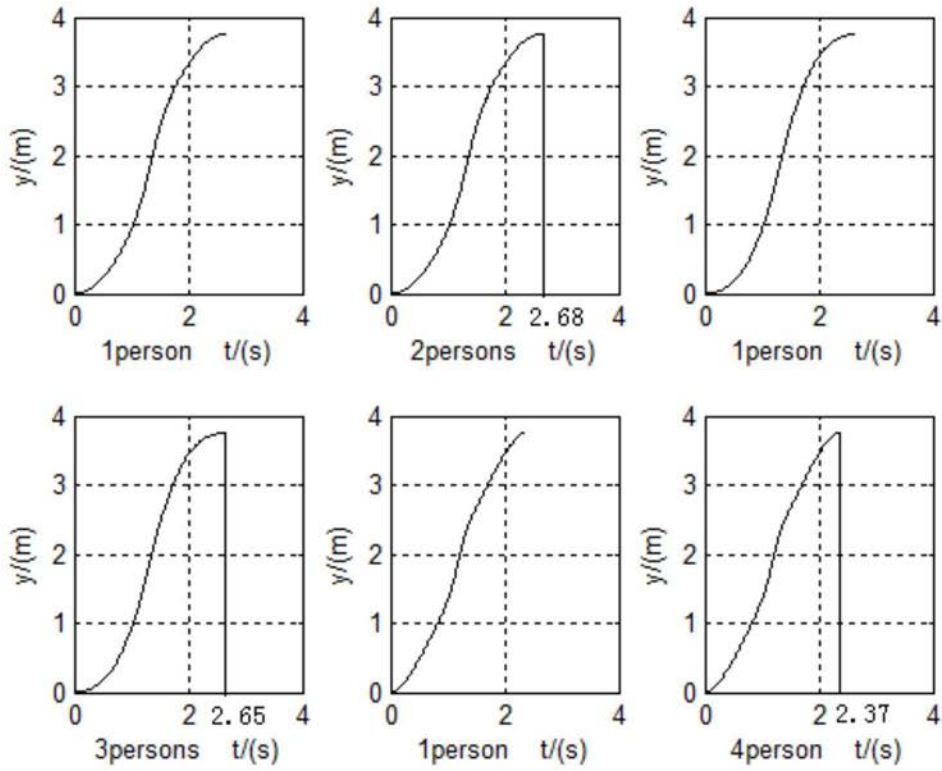


(f)

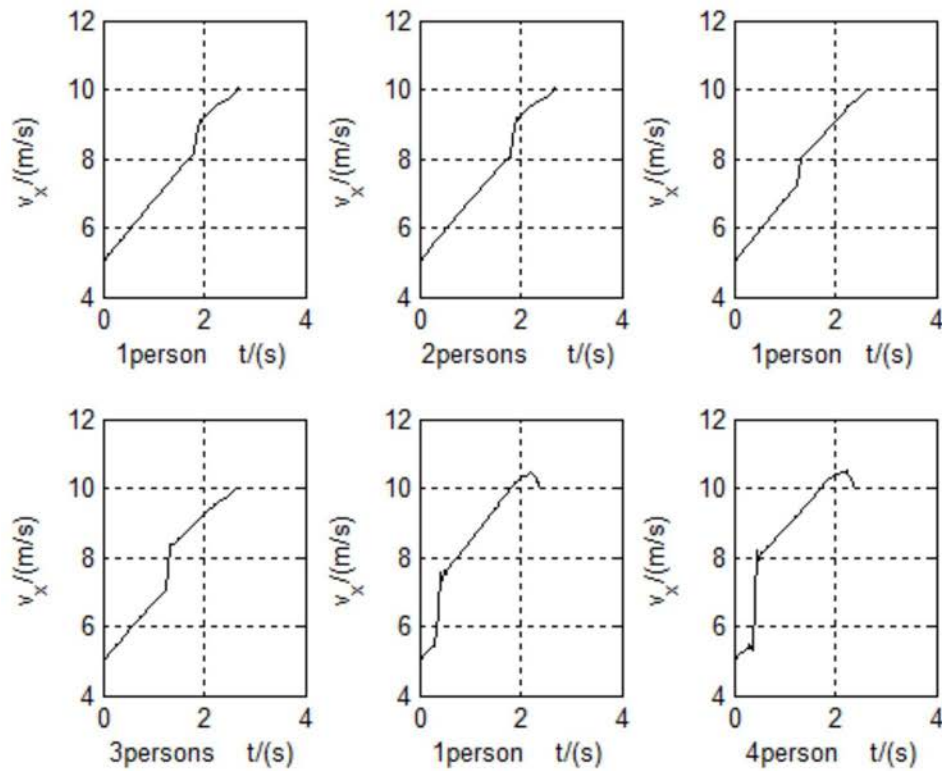
图3



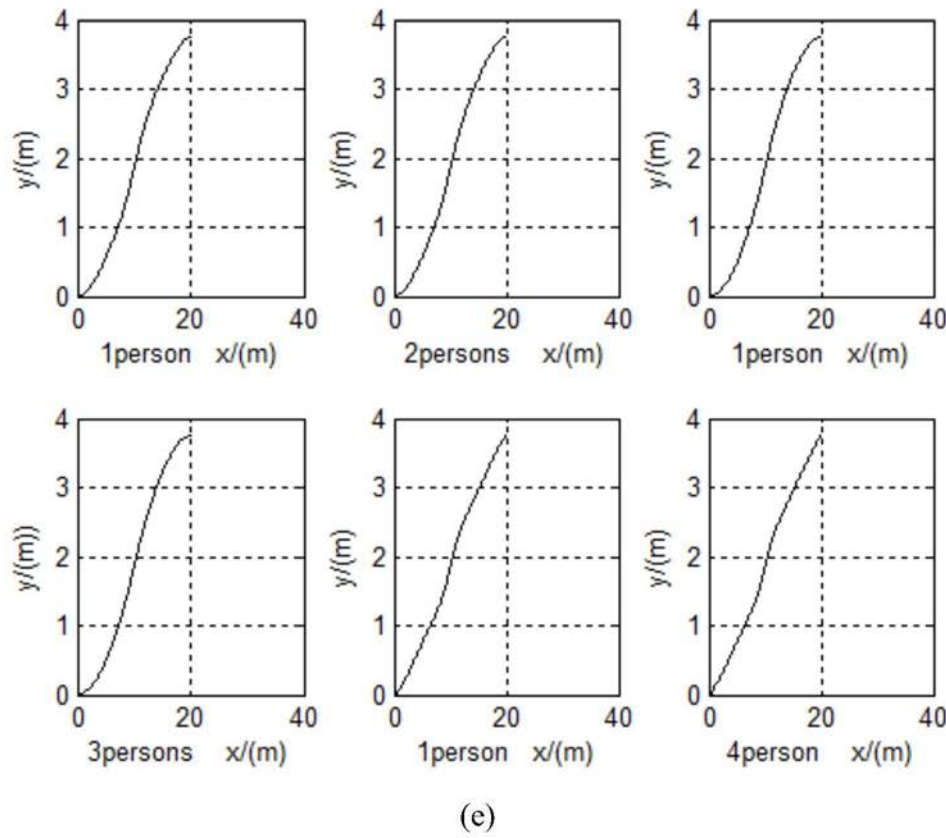
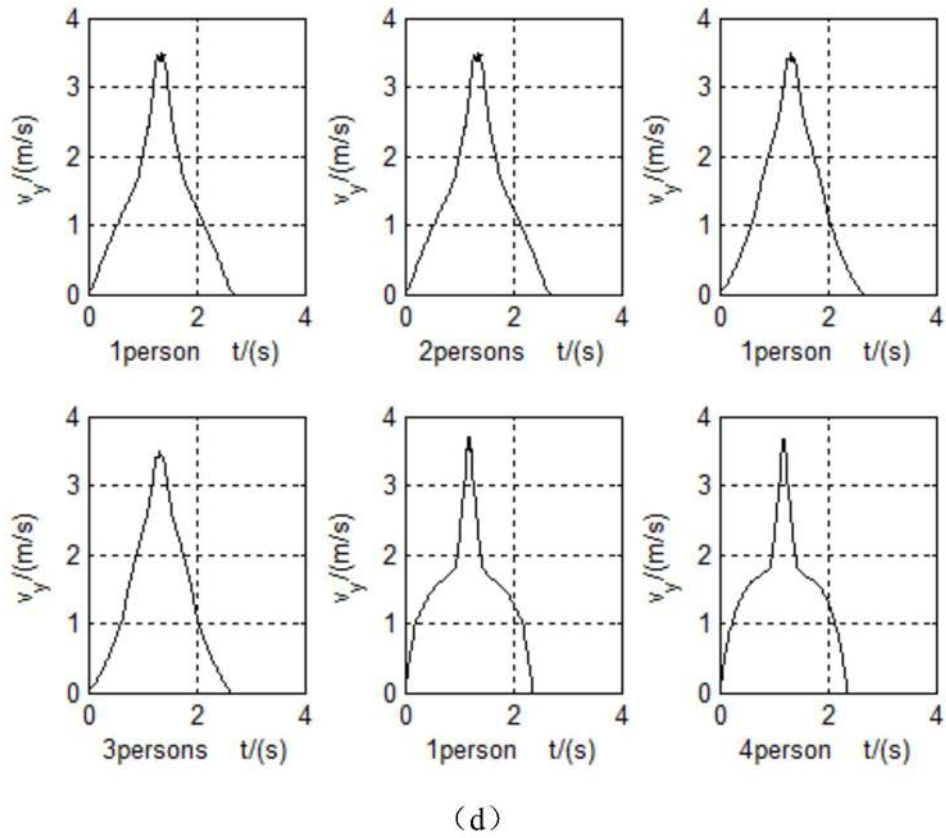
(a)

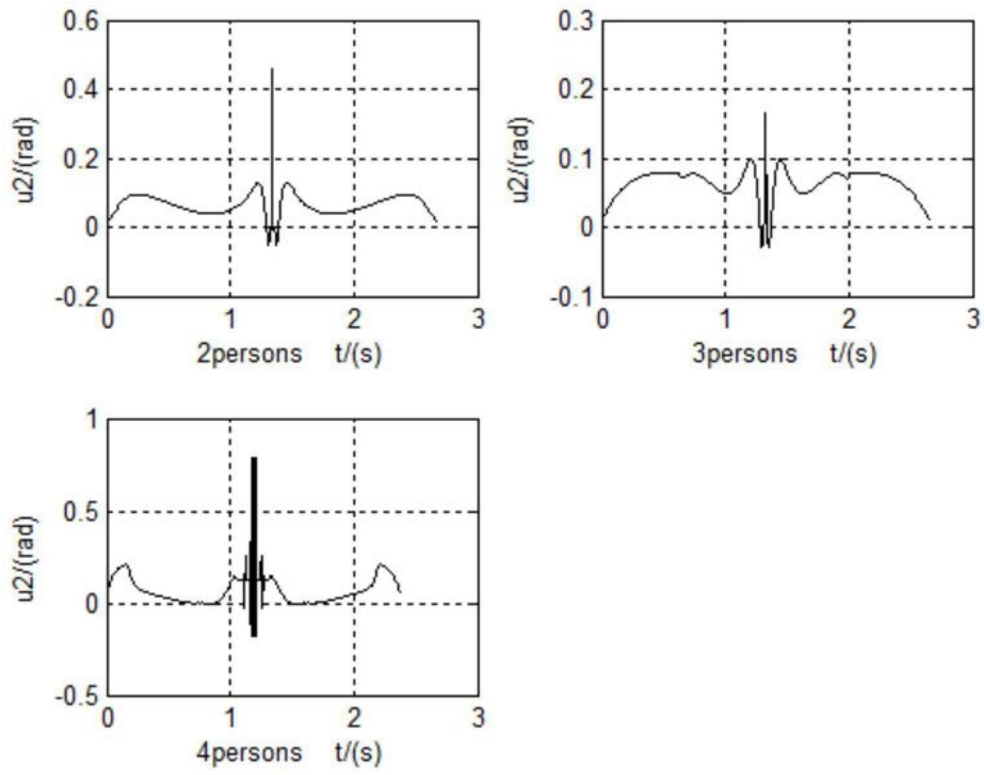


(b)



(c)





(f)

图4