

# 自动驾驶车辆 ADAS 系统仿真分析

## 摘要

高级驾驶辅助系统（Advanced Driving Assistance System, ADAS）可以利用在汽车行驶过程中随时来感应周围的环境收集来的数据，进行系统的运算与分析，以辅助驾驶员驾驶车辆。它主要包含 ACC 自动巡航系统、AEB 自动制动系统、LDW 车道偏离预警系统、BSD 盲区监测系统和 APS 自动泊车辅助等功能。

本文主要研究了 ADAS 中的 ACC 系统，ACC 系统可根据前方车辆的行驶状态自动调整本车的行驶速度，使本车与前车始终保持一个安全距离稳定行驶，在很大程度上缓解了驾驶员的驾驶压力，避免追尾事故的发生，同时也提高了道路的通行效率。因此，研究车辆自适应巡航技术对实现车辆的智能驾驶具有重要的意义。本文采用 PID 控制的方法对 ACC 系统进行了研究，首先建立了车辆定速巡航的 PID 控制算法，之后在此基础上建立了基于固定距离和基于实时计算的安全距离自适应巡航 PID 控制算法，并通过 MATLAB(2018b)/Simulink/Carsim(2019.0)的联合仿真比较了两种控制算法在跟随前车巡航和先定速巡航再跟随前车巡航这两种情况下的性能。结果显示采用固定距离自适应巡航的车辆工况更加符合前车工况，但考虑实时安全距离的自适应巡航系统安全性更高。

**关键词：**自适应巡航，PID 控制，车辆纵向运动控制

# 第一章 绪论

## 1.1 ACC 系统框架

汽车 ACC 系统主要由四部分组成，包括信息感知单元、电子控制单元、执行单元及人机交互界面，如图 1.1 所示。

(1) 信息感知单元：信息感知单元的作用是向电子控制单元提供 ACC 系统传感器感知的各种信息，包括测距传感器获取的本车与前方车辆的距离信息，转速传感器获取的实时车速信息，转向角传感器获取的汽车转向信息，节气门位置传感器获取的节气门开度信息，以及制动踏板传感器感知的制动踏板动作信息。

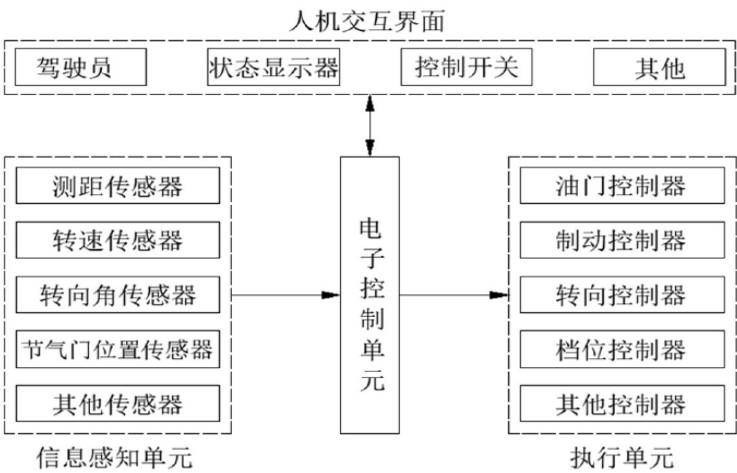


图 1.1 ACC 系统组成

(2) 电子控制单元：电子控制单元的作用是结合信息感知单元获取的信息对本车的行车状态和周围的环境状态进行判断，并根据驾驶员所设定的安全车距及车速，对车辆的控制策略进行决策，输出汽车的油门开度信息和制动压力信号控制汽车的加速度。当本车与前车之间的距离小于安全车距时，电子控制单元根据本车与前车之间的相对速度，计算出本车与前车应该保持的一个安全车距，控制本车进行减速，或者通过报警器提醒驾驶员采取相应措施。

(3) 执行单元：执行单元的作用是根据电子控制单元发出的控制信号，对本车的速度或者方向进行调整。执行单元主要包括油门控制器，制动控制器，转向控制器，档位控制器等执行机构。对于 ACC 系统来说，主要是通过油门控制器和制动控制器对车辆的纵向行驶速度进行控制。

(4) 人机交互界面 人机交互界面用来显示车辆的系统状态参数以及驾驶员设

定的参数。驾驶员可通过人机交互界面对本车车速，以及需要与前方车辆保持的安全车距等行车参数进行设置，也可以通过人机交互界面开启及关闭 ACC 系统。

当行驶车辆启动 ACC 系统时，安装于车辆前部的测距传感器会不断对前方路况进行扫描，同时车速传感器也会获取本车的速度信号。当前方有车辆或者障碍物时，ACC 系统会自动进入自适应巡航模式，如果前方车辆与本车的距离大于或小于设定的安全车距，ACC 系统会根据本车车速计算出一个相对的安全距离，同时输出加速度控制信号给下层执行器，对本车车速进行调节，使得本车与前车之间始终保持在一个安全的行驶车距。如果前方没有车辆或者其他障碍物时，ACC 系统会切换到定速巡航模式，系统会根据驾驶员提前设定的一个速度和车速传感器采集到的本车车速自动控制油门踏板，来对本车车速进行调节，使本车始终保持在设定好的速度稳定行驶，汽车 ACC 系统工作原理如图 1.2 所示。

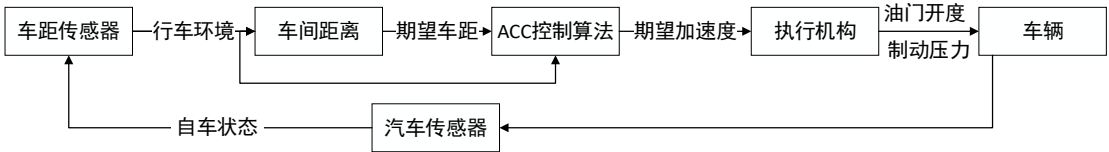


图 1.2 ACC 系统工作原理

## 1.2 研究内容

本文主要 ADAS 系统中的基于 PID 控制方法的自动驾驶车辆的自适应巡航问题。

- (1) 车辆 ACC 系统总体方案设计。设计车辆自适应巡航控制的总体方案，并对方案设计中的各关键技术进行说明。
- (2) 车辆动力学模型的建立。通过 Carsim 软件建立车辆的纵向动力学模型。
- (3) 车辆 ACC 系统控制算法设计。设计车辆 ACC 系统控制中各项关键技术的算法以及车辆 ACC 的 PID 控制算法。（基于固定距离和基于安全距离）
- (4) 控制系统仿真研究。设计车辆 ACC 系统 MATLAB/Simulink/Carsim 联合仿真模型，对模型车辆在跟随前车以及先定速巡航再跟随两种情况下进行联合仿真研究。

## 第二章 自适应巡航总体控制方案

### 2.1 ACC 系统模式切换流程

车辆在路面上行驶时，通常面临着复杂多变的行驶状况，为了在面对不同行驶状况时车辆能稳定行驶，车辆 ACC 系统一般分为两种工作模式，即定速巡航和跟随巡航，其中跟随巡航又包括加速控制、减速控制、启动控制和停车控制四种情况。

定速巡航是指汽车在道路上以提前设定好的速度匀速行驶，当本车速度小于设定的目标速度时，本车做加速运动直至达到设定好的目标速度，达到目标速度后本车匀速行驶。跟随巡航时，本车根据前车的行驶状态，自动调整本车的行驶状态，使得本车始终与前车保持一个安全的跟车距离。自适应巡航就是本车根据行驶状况自动选择合适的工作模式来保证行车安全和提高道路的通行效率。定速巡航与跟随巡航模式的切换流程如图 2.1 所示。

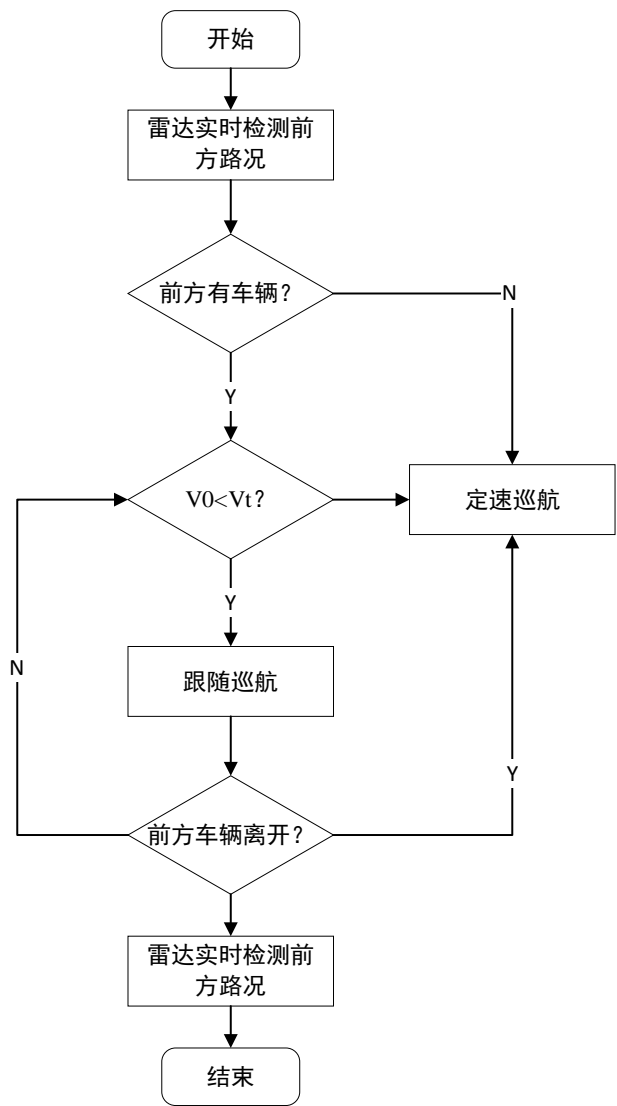


图 2.1 定速巡航与跟随巡航模式的切换流程( $v_0$  巡航速度,  $v_t$  前车速度)

## 2.2 自适应巡航安全间距策略

车辆在行驶过程中需要始终与前车保持一定的距离，以避免前车突然急停或者本车速度过快而导致追尾事故的发生，但是与前车保持的距离也不宜过大，否则会影响道路的通行效率。所以两车距离的大小应该是在保证安全行驶的前提下又不至于影响到道路的通过能力。

可变间距策略主要分为两种，分别是仿人间距（Human Factor Distance, HFD）策略和基于车头时距的间距策略，车头时距指同一车道上的前后两辆车车头通过同一地点的时间差，通常用前后两辆车车头之间的距离除以后车的速度计算。仿人间距策略主要考虑到车辆行驶的绝对安全性，对两车间距过大时会被其他车辆插队的情况考虑较少，所以较常用的是基于车头时距的间距策略。基于车头时距的间距策略又分为固定车头时距（Constant Time Headway, CTH）策略和可变车头时距（Variable Time Headway, VTH）策略。

固定车头时距(CTH)间距策略的一般表达式如下：

$$\Delta x = t_h v + \Delta x_0 \quad (1)$$

其中：

$\Delta x$ 表示期望的安全距离；

$t_h$ 表示车头时距；

$v$ 表示本车车速；

$\Delta x_0$ 表示最小安全距离。

本文的固定距离自适应巡航的安全距离由公式(1)计算而来，其中 $t_h = 1.2$ ， $\Delta x_0 = 3$ ， $v=100/3.6$ ，因此计算可得本文的安全距离 $d_{des}$ 应设置为 35m。

Yanakiev 等人认为车头时距应该与本车车速和前车车速都有关系<sup>[1]</sup>，当前车车速大于本车车速时，应该适当减小车头时距，以增加道路的通行效率，当前车车速小于本车车速时，应适当增大车头时距，以保证驾驶的安全性：

$$t_h = t_0 - c_v v_r \quad (2)$$

其中：

$t_0$ 、 $c_v$ 为大于 0 的常数；

$v_r$ 为前后车辆的相对速度。

Yanakiev 等人提出的 VTH 策略考虑了前后两车的相对运动关系，控制效果较前述策略也有了进一步的提高，但是该策略中存在着一个明显的不合理之处，当前后两车的相对速度不变时，车头时距就不再变化，实际情况中，当前车处于减速状态时应该适当增加车头时距来保证行车的安全性。针对此种不足，浙江大学罗莉华提出了一种考虑前车速度变化趋势的可变车头时距策略，该策略增加了对前车加速度的考虑，提高了 ACC 系统控制的动态性，罗莉华提出的间距<sup>[2]</sup>中车头时距的计算如下：

$$t_h = t_0 - c_v v_r - c_a a_t \quad (3)$$

其中：

$a_t$ 为前车加速度；

$t_0$ 、 $c_v$ 、 $c_a$ 为大于 0 的常数。

本文的基于实时安全距离的自适应巡航的安全距离由公式(3)计算，其中 $t_0 = 1.5$ ， $c_v = 0.08$ ， $c_a = 0.1$ ，并加入最小安全距离 $x_0 = 5\text{m}$ ，同时为防止间距过大或者过小设置车头时距的范围为 0.2s~2.2s。此外为使车辆行驶更加平稳，当现在所需要的安全距离小于固定安全距离 35m 时，车辆将以保持 35m 的间距为目标跟随前车行驶。安全距离 Simulink 算法图如下所示。

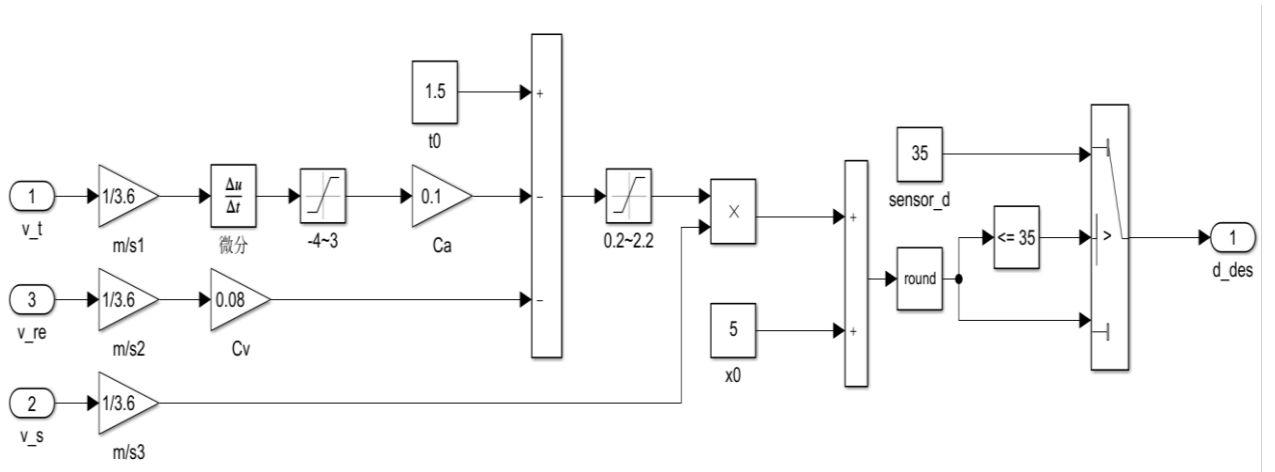


图 2.2 安全距离计算

## 2.3 ACC 自适应巡航算法设计

### 2.3.1 PID 算法理论基础

PID 控制广泛应用与工业控制的各领域，是对偏差进行比例、积分、微分而得到的控制规律，即

$$u(t) = k_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

其中：

$k_p e(t)$  是比例控制项， $k_p$  是比例系数；

$\frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt$  是积分控制项， $T_i$  是积分时间常数；

$\frac{de(t)}{dt}$  是微分控制项， $T_d$  是微分时间常数。

将(4)式展开，并令  $k_i = \frac{k_p}{T_i}$ 、 $k_d = k_p T_d$ ，则可通过将参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  设置为不同的值，从而通过比例，积分，微分三个环节根据输入的偏差给出对输入的一个相对合理的调整。PID 控制框图如下图 2.3 所示：

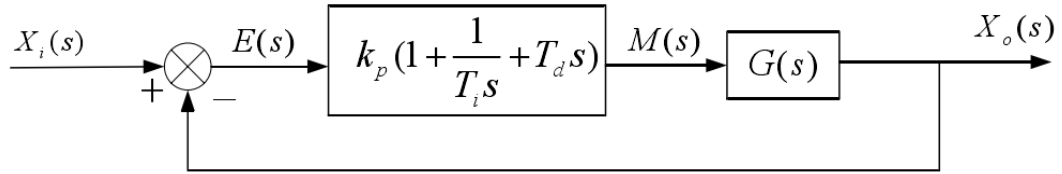


图 2.3 PID 控制原理图

PID 控制器多用在串联校正环节，本文使用 PID 控制器以使车辆能够按照期望的速度或者间距行驶，PID 控制器的作用如下：

(1) 比例环节可以加快系统的响应速度，增加  $k_p$  可以减小系统的稳态误差，但过大的  $k_p$  会使得系统的动态质量变坏，引起系统震荡，系统的动态性能和稳定性变差。

(2) 积分系数  $k_i$  的作用是减小系统的稳态误差， $k_i$  越大，系统的稳态误差消除的越快，过大的  $k_i$  也会引起系统的超调从而影响系统的调节精度。比例控制项加积分控制项可以消除系统的稳态误差，但是系统的动态过程会变慢，若积分控制作用过强还会使得系统的超调量增大，使得系统不稳定。

(3) 微分系数  $k_d$  的作用在于提前预测偏差变化，提前抑制  $k_p$ 、 $k_i$  产生的超调，加快系统的响应速度，减小超调、振荡，有助于改善系统的动态性能。但过大的  $k_d$  会使系统控制过程提前制动，从而延长系统调节的时间。

### 2.3.2 定速巡航算法设计

定速巡航是指 ACC 系统按照驾驶员提前设定好的巡航速度控制车辆行驶，并在达到设定速度后继续保持这一速度不变的行驶状态，定速巡航控制的主要目的是控制车辆保持设定速度不变。

本文设置定速巡航速度  $v_{des} = 100\text{km/h}$ ， $k_p = 0.86$ ， $k_i = 0.0045$ ， $k_d = 0.82$ ，控制器输入为期望速度  $v_{des}$  以及自车速度  $v_s$ ，输出期望加速度  $a_{des}$ 。此外在 Carsim 中测得 C-Class 车辆的加速度的在  $-8\sim 5\text{m/s}^2$ ，因此设置饱和函数将 PID 输出的加速度限制在车辆的加速度范围内。Simulink 算法图如下所示。

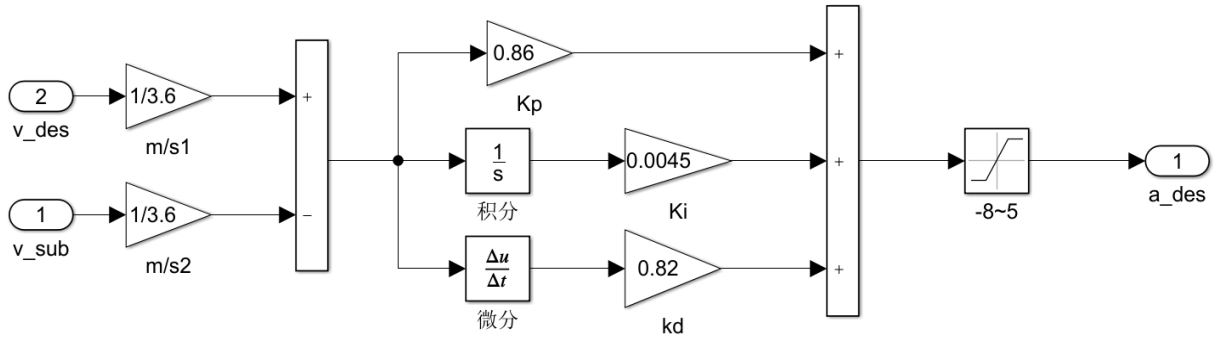


图 2.4 定速巡航算法图

### 2.3.3 跟随巡航控制算法设计

跟随巡航指本车根据前车行驶情况自动调整本车速度，使得本车始终与前车稳定保持在一个安全跟车距离的行驶状态。跟随巡航的控制目标是控制本车与前车之间的距离保持在安全跟车间距。

本文设置固定安全距离  $d_{con} = 35\text{m}$ ，实时安全距离  $d_{safe}$  由 2.2 节的安全距离算法计算， $k_p = 0.085$ ， $k_i = 0.006$ ， $k_d = 0.8$ ，控制器输入为期望间距  $d_{des}$  以及雷达测得间距  $d_s$ ，输出期望加速度  $a_{des}$ 。Simulink 算法图如下所示。



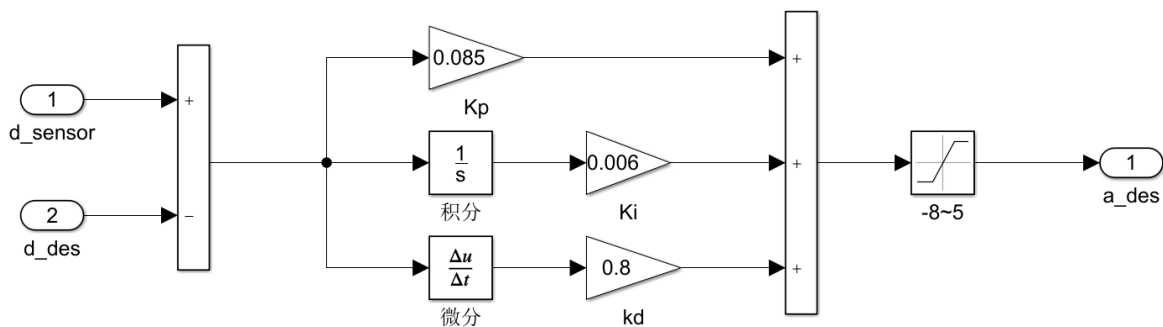


图 2.5 跟随巡航算法图

### 2.3.3 节气门和制动切换控制

本文假设节气门开度和汽车加速度成正比比例系数为 $k_t$ ，制动主缸压力与减速度成反比比例系数为 $k_b$ ，由 Carsim 实际测得节气门开度为 1 时加速度为  $0.442g$ ，主缸压力位  $30Mpa$  时制动减速度为  $0.8g$ ，其中  $g = 9.8m/s^2$ 。因此计算可得  $k_t = 0.2309$ ， $k_b = -3.8265$ 。控制算法如下图所示。

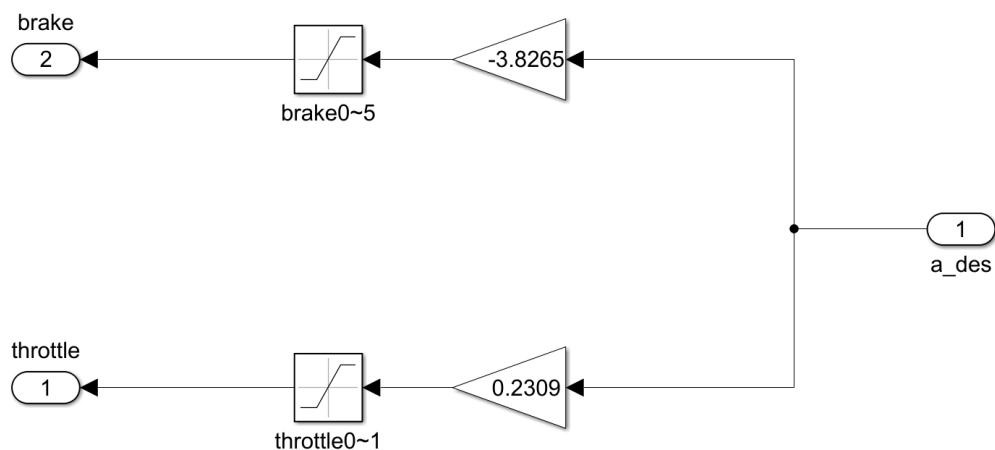


图 2.5 节气门和制动切换控制算法图

### 2.3.4 自适应巡航算法总框架图

#### (1) 固定安全距离(35m)

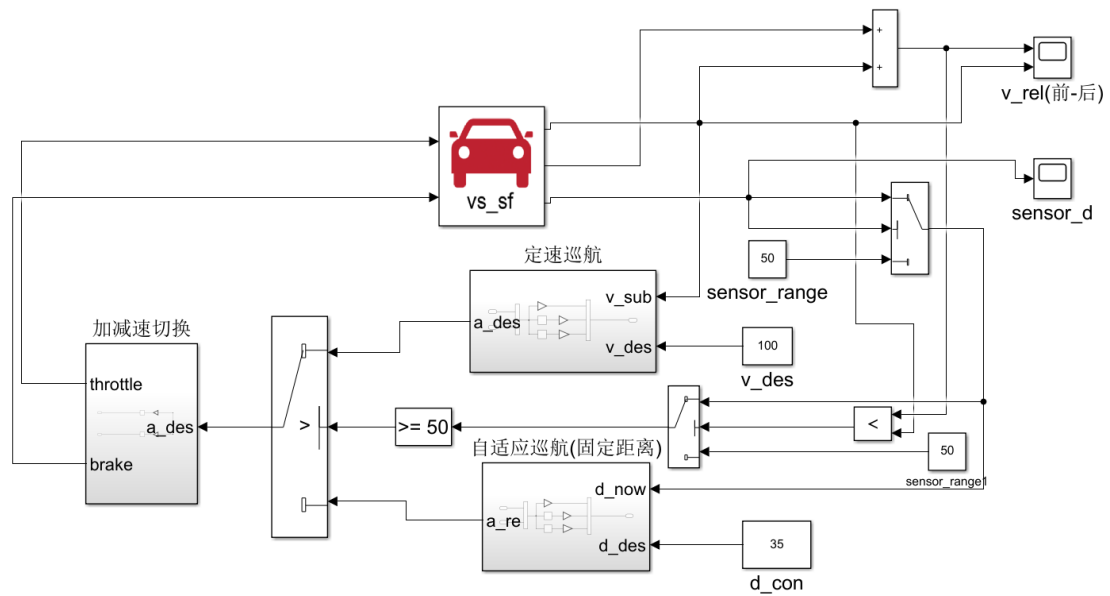


图 2.6 固定安全距离控制算法图

#### (2) 实时计算安全距离

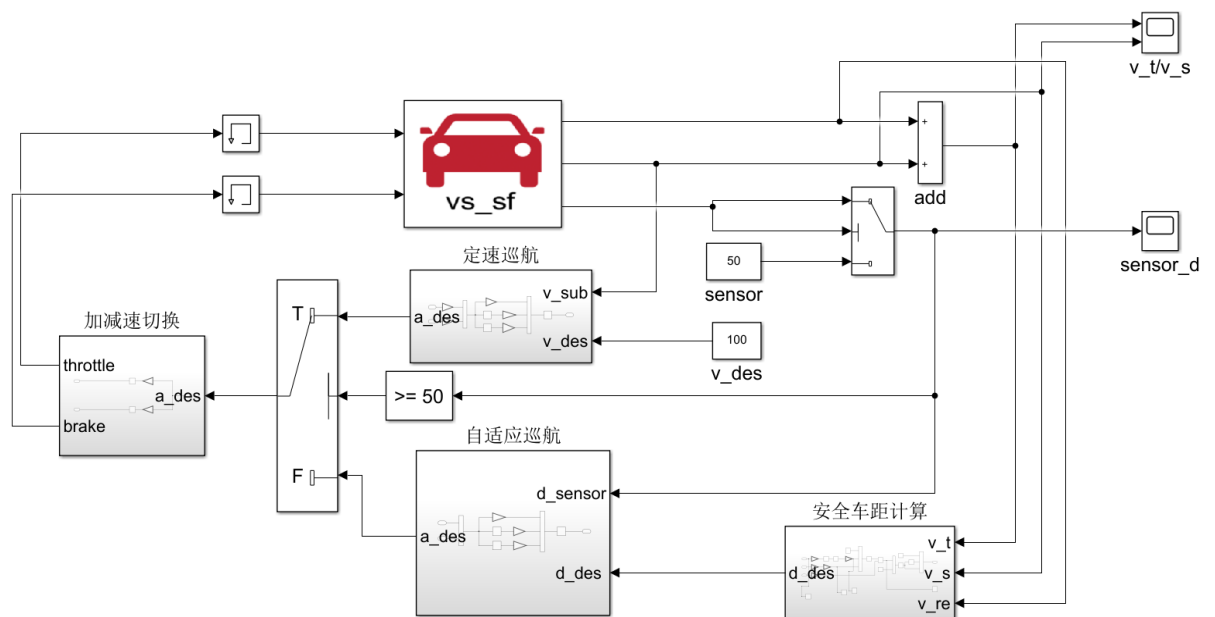


图 2.7 实时计算安全距离控制算法图

实时计算安全距离由于控制器前期震荡的原因，造成计算出的安全车距也由一定的微小波动，为减小因此引起的车辆行驶的不稳定状况，加入 memory 模块将控制指令延后一个周期输入。

### 第三章 MATLAB\Simulink\Carsim 联合仿真

本章在第二章的算法基础上，对本文设计的两种自适应巡航系统进行了仿真测试，测试基于 MATLAB/Simulink/Carsim 联合仿真平台，其中定速巡航的仿真考虑了两种情况：(1)初始速度(0km/h)大于期望速度(100km/h)；(2)初始速度(100)小于期望速度(60km/h)。跟随巡航的仿真也考虑了两种情形：(1)跟随前车起步并一同行驶；(2)先进行定速巡航再检测到前车后进行跟随巡航。

#### 3.1 Carsim 仿真基本参数设置

(1) 自车参数：本文采用 Carsim 车辆库中的 C-Class 车，发动机额定功率为 125kw，传动系统采用六档变速器，带有 ABS 制动放抱死系统。自车簧载质量为 1270kg，轴距 2910mm。详细参数如下图 3.1 和 3.2 所示。

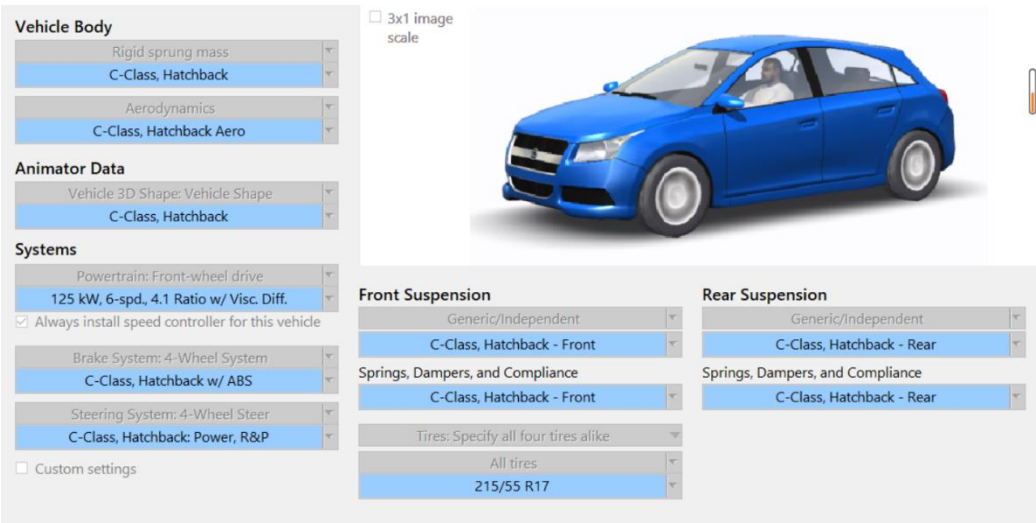


图 3.1 自车配置情况图

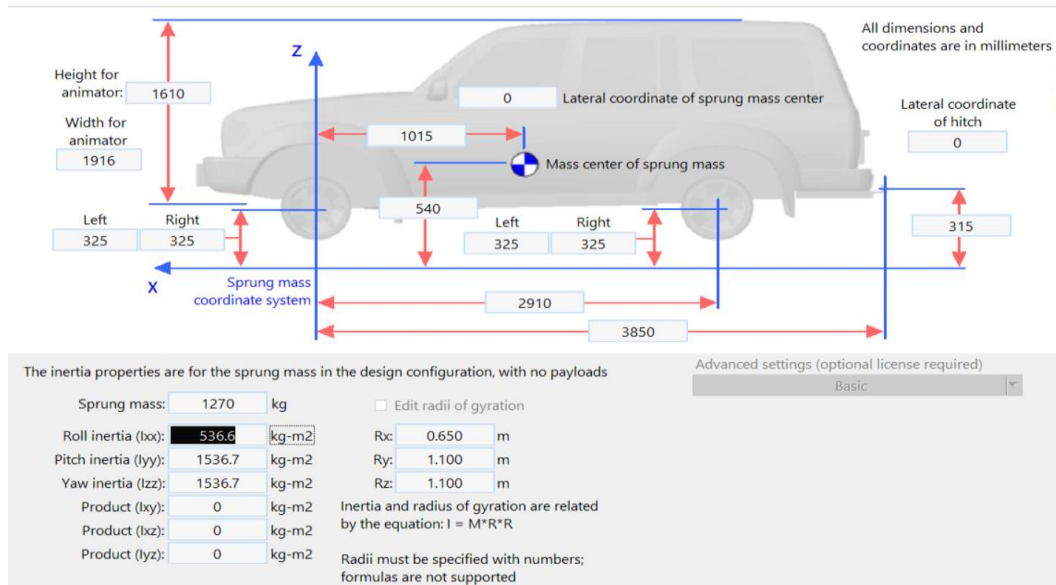


图 3.2 自车详细车型参数

(2) 前车参数: 本文采用 Carsim 车辆库中的 F-Class 车, 发动机额定功率为 300kw, 传动系统采用 CVT 无极变速, 带有 ABS 制动放抱死系统。前车簧载质量为 1820kg, 轴距 3160mm。详细参数如下图 3.3 和 3.4。

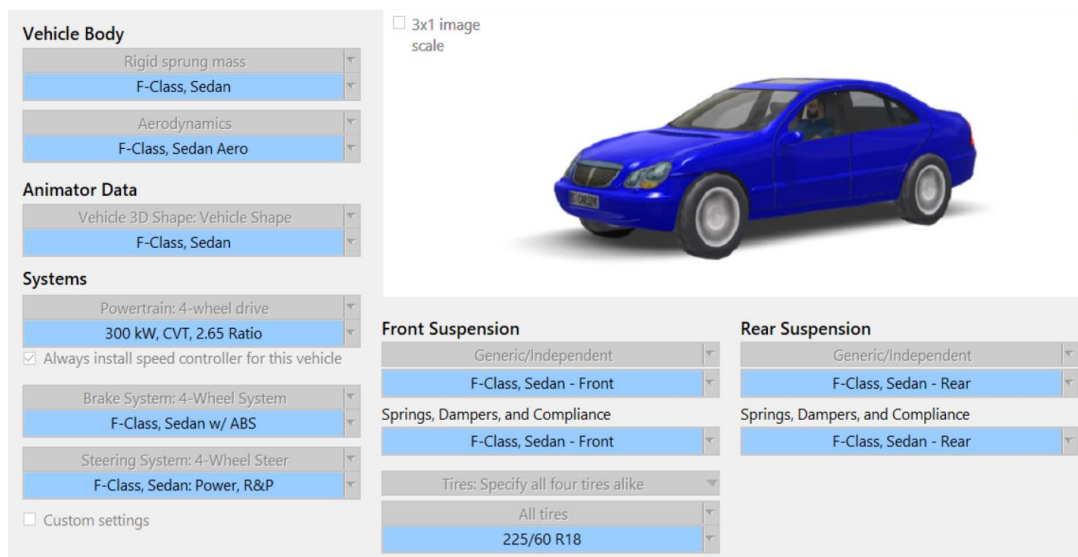


图 3.3 前车配置情况图

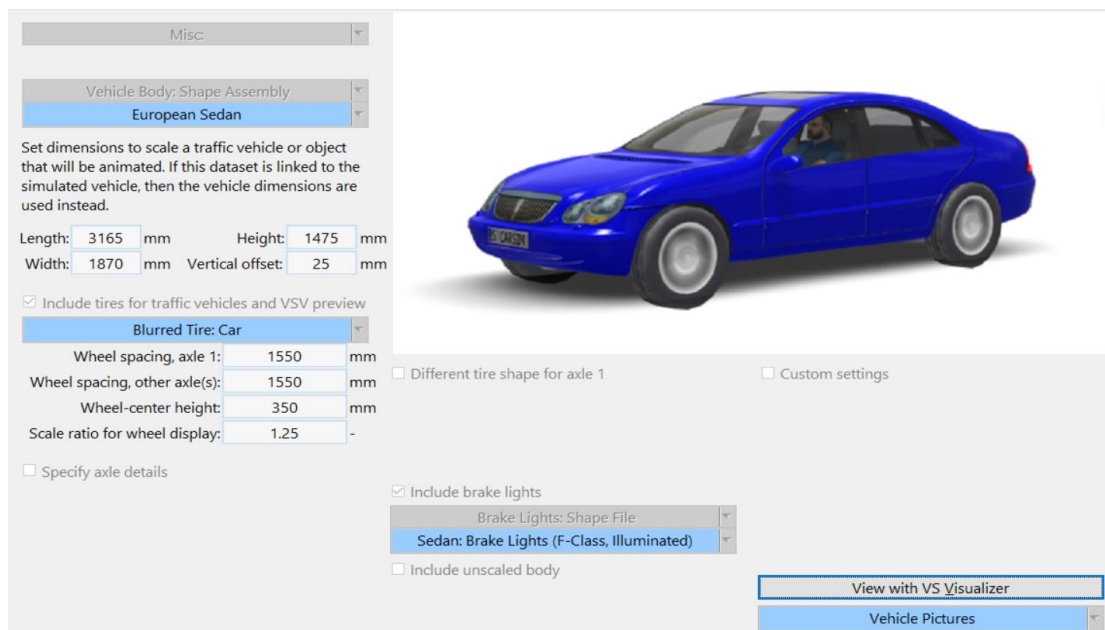


图 3.4 前车车型参数图

(3) 自车雷达参数：设置雷达范围为 50m，最大测量角度为 20deg，设置为不随距离衰减。具体参数如图 3.5 所示。

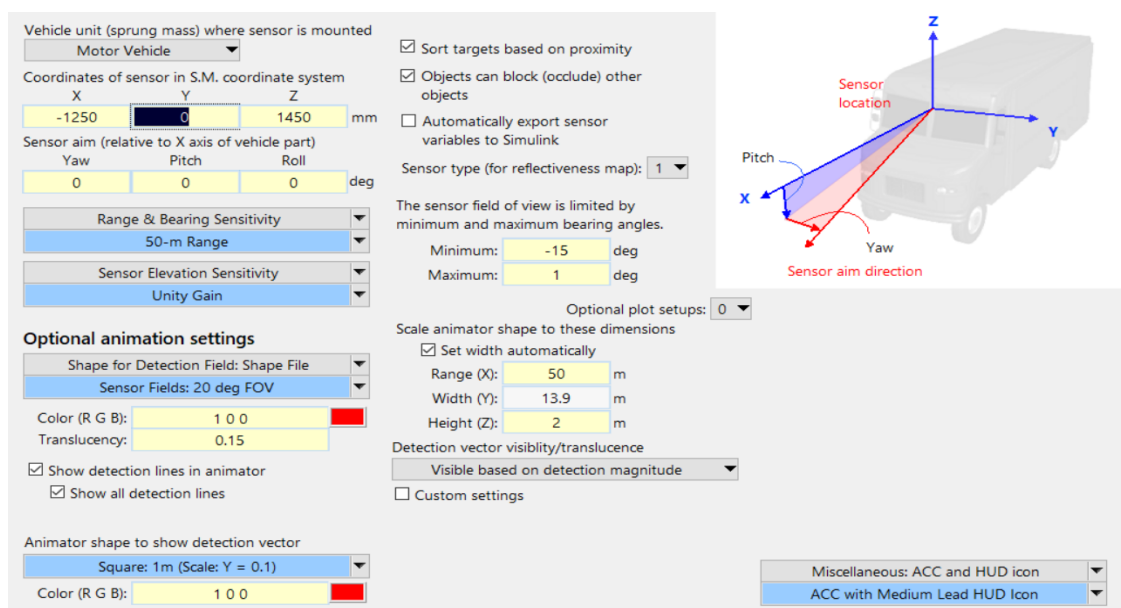


图 3.5 前车雷达参数图

(4) 车辆输入输出变量:

输出: IMP\_PCON\_BK 前车与自车相对速度 $v_{rel}$ ,  $V_x$  自车速度 $v_s$ 以及 DisS1\_1 前车相对于后车的距离 $d$ ;

输入: IMP\_THROTTLE\_ENGINE 节气门开度(0~1), IMP\_PCON\_BK (0~10Mpa)。输入输出参数如下图 3.5 所示。

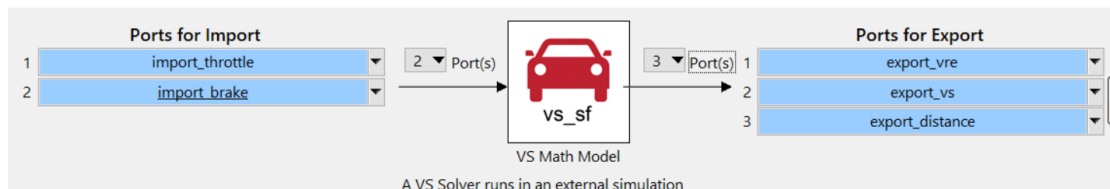


图 3.6 Carsim 输入输出参数

## 3.2 定速巡航

(1)初始速度(0km/h)大于期望速度(100km/h)

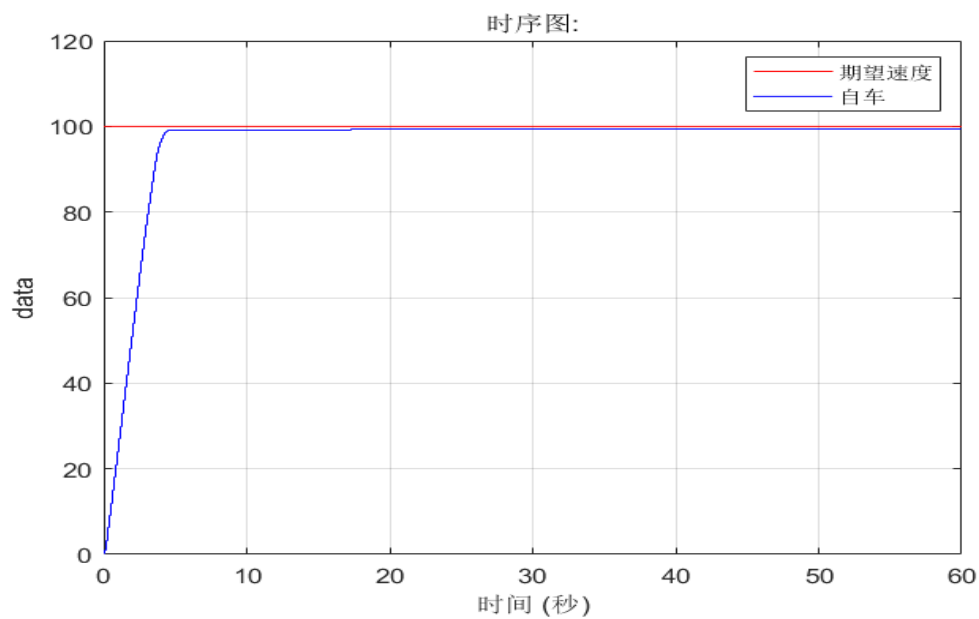


图 3.7 自车纵向速度曲线（初始小于期望速度）

从上图可以看出，自车可以在 10s 内从 0 加速到期望速度 100km/h，并保持期望速度稳定的继续行驶。

(2)初始速度(100)小于期望速度(60km/h)

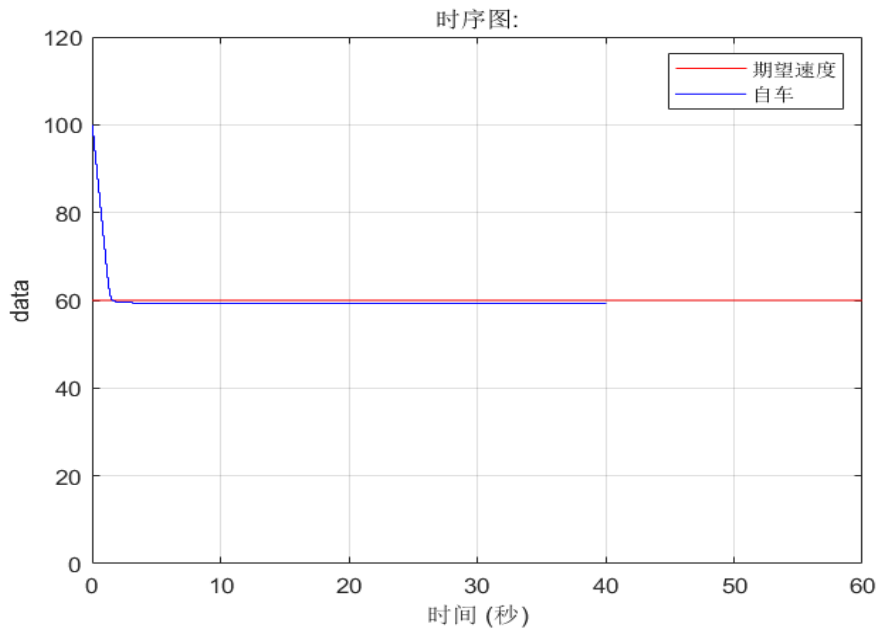


图 3.8 车辆纵向速度曲线（初始大于期望速度）

从上图可以看出，自车在初始大于期望速度的情况下，仍然可以很快减速到期望速度，并保持期望速度稳定行驶。

综上所述，本文设计的定速巡航算法，基本上可以实现控制车辆以期望速度稳定的行驶。

## 3.2 跟随巡航

### 3.2.1 跟随前车起步并一同行驶(初始相距 10m)

(1) 前车工况：如下图 3.9 所示

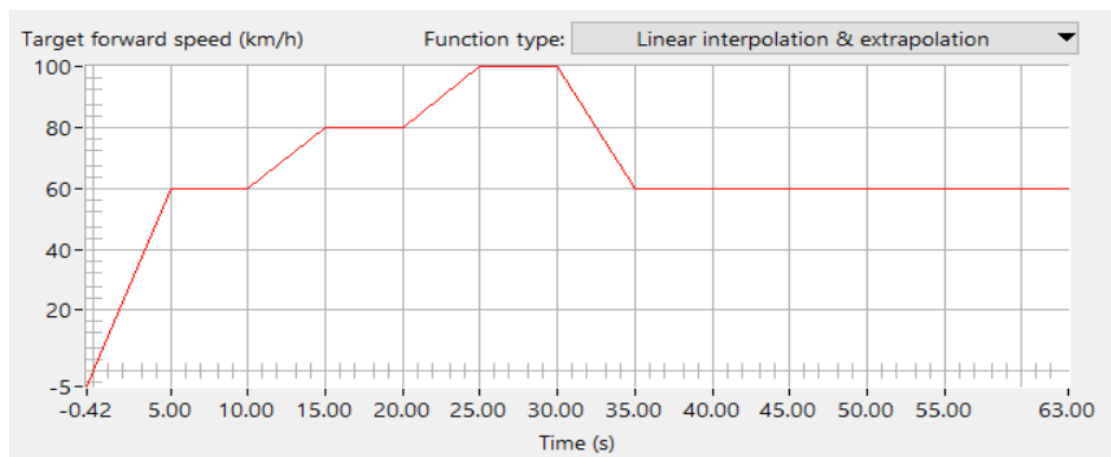


图 3.9 前车工况图

(2) 定距离跟随巡航

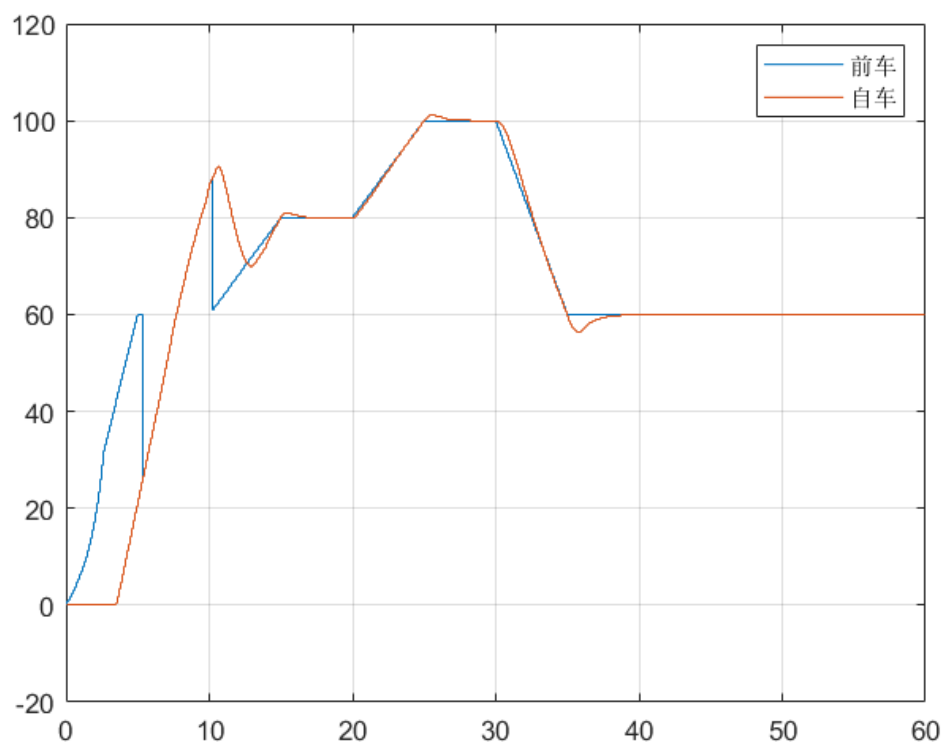


图 3.10 前车和自车纵向速度曲线

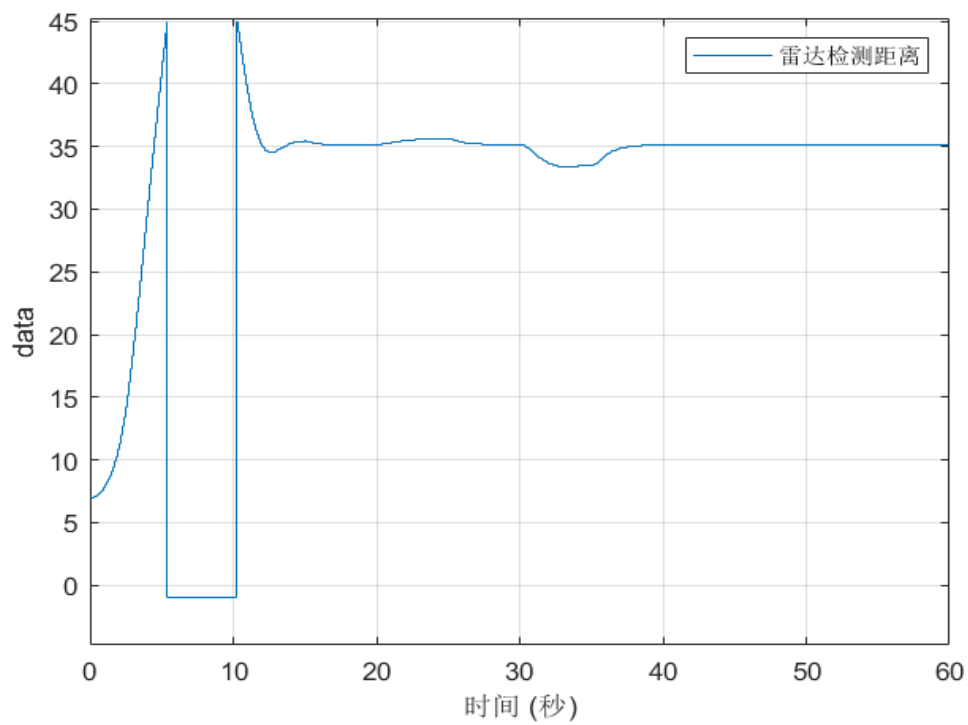


图 3.11 相对距离



从图 3.10 和 3.11 可以看出，固定安全距离的跟随巡航自车的实际工况可以很好的拟合前车的设定工况(除起步阶段外)，在后续的行驶过程中也可以将跟车距离基本稳定在本文设定的安全距离 35m 左右。这说明，固定安全距离的跟随巡航模块，可以做到很好的跟随前车行驶。

(3) 基于实时安全距离的跟随巡航

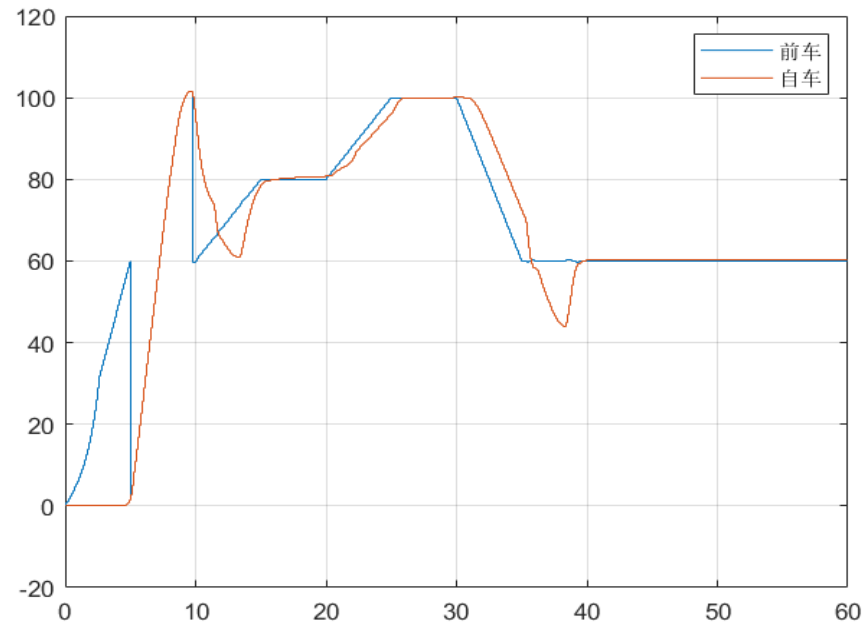


图 3.12 前车和自车纵向速度曲线

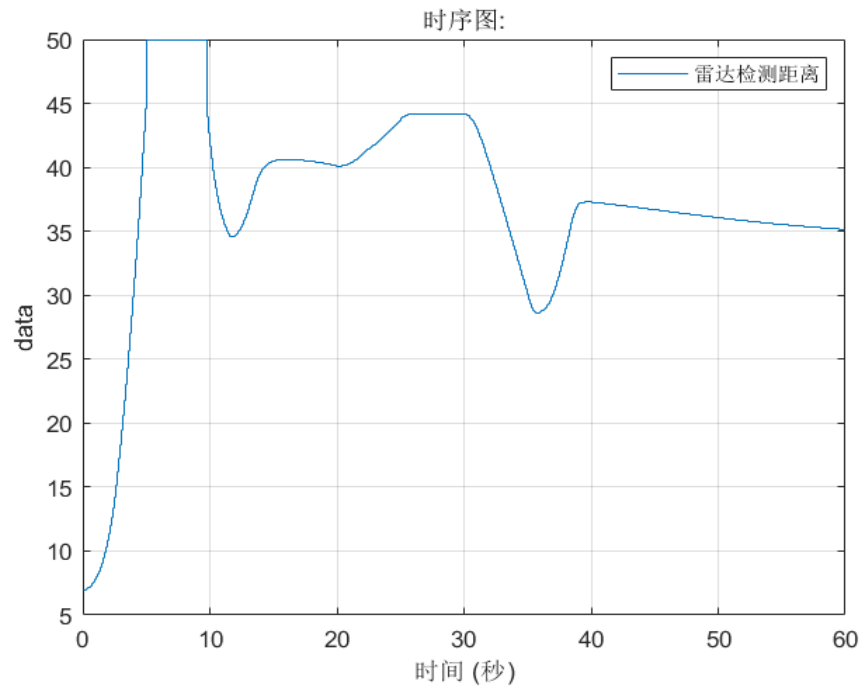
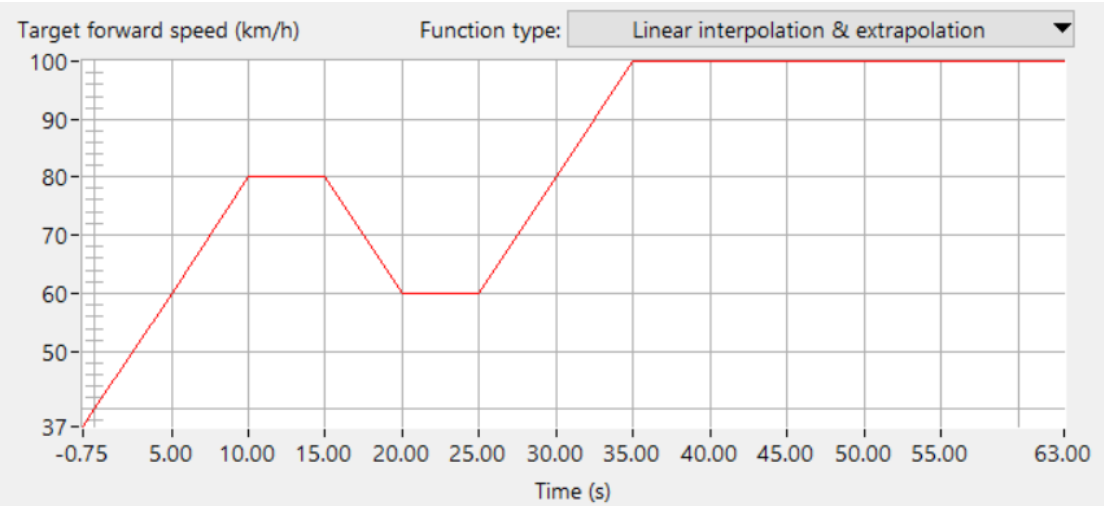


图 3.13 相对距离

由上图可知，基于实时安全距离的跟随巡航系统，在当前情况下也可以较好的拟合前车的工况，但由于自车的期望跟驰距离是通过实时计算的安全距离确定的导致自车于前车的跟驰距离始终在发生变化，可能会使行驶稳定性差。

3.2.1 先进行定速巡航再检测到前车后进行跟随巡航(初始相距 80m)

(1) 前车工况：如图 3.14



(2) 定距离跟随巡航

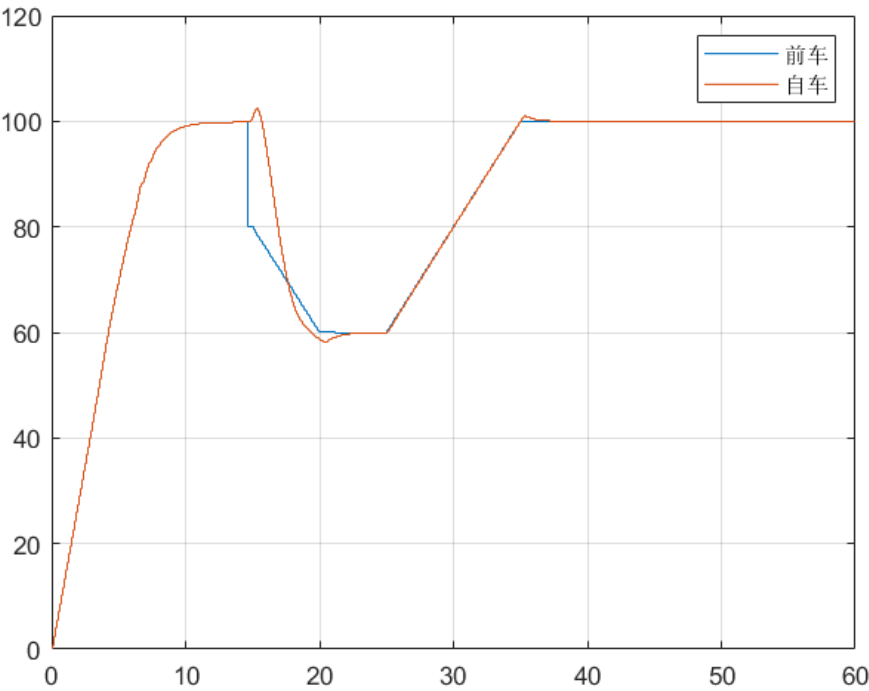


图 3.15 前车和自车纵向速度曲线

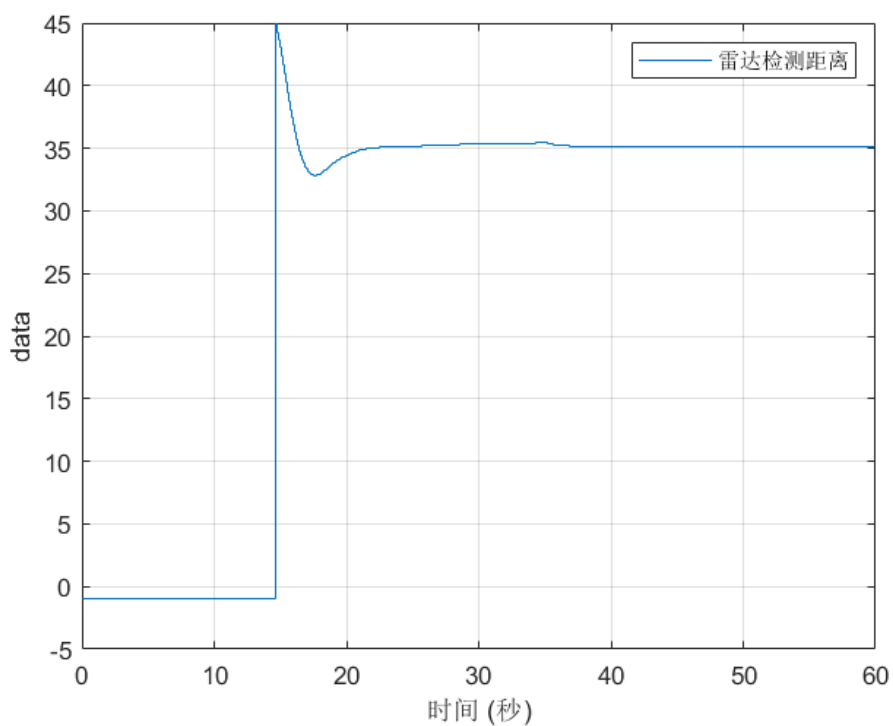


图 3.16 相对距离

从图 3.15 和 3.16 可以看出，在先进进行定速巡航再检测到前车后进行跟随巡航(初始相距 80m)情况下，自车先定速巡航达到期望速度 100km/h(0~7s 左右)，在遇到车后跟随前车行驶，实际工况也可以较好的拟合前车的设定工况，在后续的行駛过程中也可以将跟车距离基本稳定在本文设定的安全距离 35m 左右。

### (3) 基于实时安全距离的跟随巡航

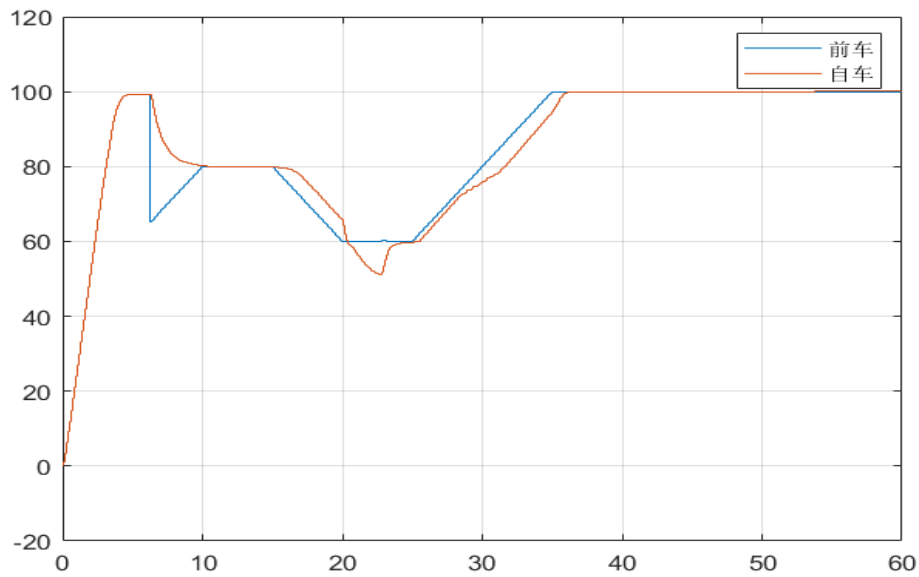


图 3.17 前车和自车纵向速度曲线

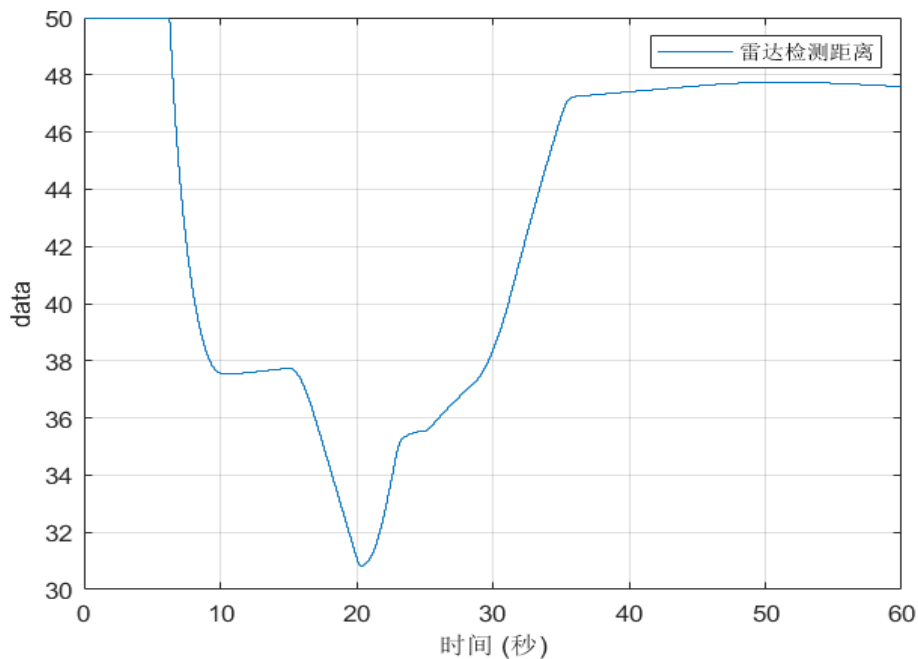


图 3.18 相对距离

由上图 3.17 和 3.18 可知，基于实时安全距离的跟随巡航系统，也可以做到先定速巡航再跟随前车运行，也可以较好的拟合前车(但波动性相对偏大)的工况，同样的由于自车的期望跟驰距离是通过实时计算的安全距离确定的导致自车于前车的跟驰距离始终在发生变化，最后在两车速度都为 100km/h 时稳定在 47m 左右。

## 第四章 结论

由第三章的仿真实验可以验证本文建立的定速巡航和跟随巡航算法，基本能够实现控制车辆以期望速度行驶，并在遇到前方车辆时，可以切换为跟随行驶模式，以固定距离或者实时的安全距离跟随前车行驶。这说明本文所建立的模型实现了自适应巡航的基本功能。

此外，本通过将基于固定距离和基于实时安全距离两种算法进行仿真比较，发现基于固定距离(35m)算法控制下间距更加稳定，和前车的工况也更加相似。但是，就第三章仿真结果可以发现在双方速度都在 100km/h 时，实时的安全距离应该在 47m 左右，那么此时如果继续保持固定距离 35m 便有可能导致事故发生。因此，虽然基于实时安全距离控制的自适应巡航平稳性稍微差一些，当出于对安全的考虑，仍应选择基于实时安全距离的控制算法。此外，实时安全距离的控制不稳定的主要原因，也可能是 PID 控制器参数设置不好所导致的，后续可引入模糊 PID 控制器，针对车辆具体的行驶状况，给出相应的 PID 参数，以提高车辆行驶的平稳性和舒适性。

## 参考文献

- [1]Yanakiev D. , Kanellakopoulos I. Nonlinear Spacing Policies for Automated Heavy-Duty Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1365-1377
- [2]罗莉华. 汽车自适应巡航控制及相映红管交通流模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011