

浙江大学

先进控制基础课程大作业



课程设计名称 基于模型预测控制的自适应巡航系统

姓 名 丘启圆

学 号 3190300282

专 业 自动化（控制）

手 机

邮 箱 3190300282@zju.edu.cn

时 间 2022 年 11 月 6 日

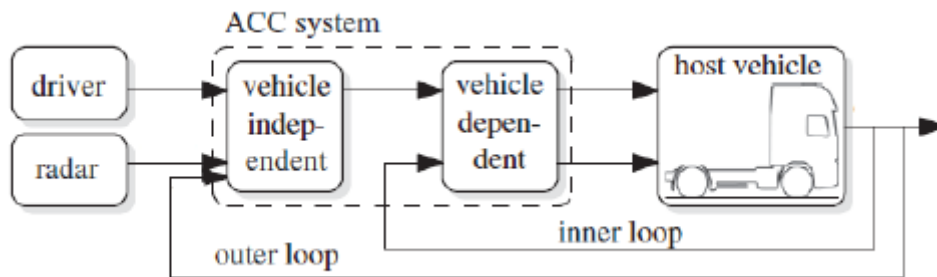
1 引言

在自适应巡航控制系统(ACC)上实施模型预测控制方法(MPC)。车辆以恒定速度移动,后面的车辆接近前面的车辆并且应该保持相同的速度。通过使用 MPC 控制器,在指定的输入约束条件下实现所需的稳定性和恒定的前车速度的目标速度。通过在 MATLAB 中的仿真,表明所提出的 MPC 策略能够将车辆保持在指定的约束条件下。

2 介绍

2.1 自适应巡航控制

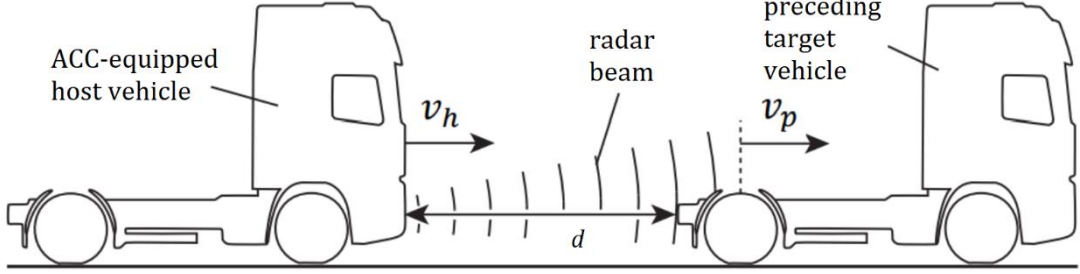
ACC 是传统巡航控制的增强,目前在大多数现代商用车辆中已标准化。经典巡航控制的目的是通过跟踪驾驶员要求的速度来保持纵向车辆速度。在 ACC 中,通过独立于驾驶员对车辆进行加速或制动,对前方车辆的速度进行额外跟踪并进行调整。通常,外部传感器(如雷达)用于检测前方车辆并测量车辆之间的相对速度。ACC 系统由两个子系统组成:车辆相关部分和车辆无关部分。前者计算车辆所需的加速和减速曲线。控制器部分形成了通过启动油门和制动系统来跟踪轮廓的相关部分。ACC 系统示意图如图 1 所示:



ACC 系统主要的控制目标是跟随前车,除此之外也还有其他方面需要考虑,例如舒适性、燃油经济性和安全性。在这里 ACC 系统更像是一种舒适系统而不是安全系统,因为减速被限制在 3 m/s^2 。此外,停走功能也可以与 ACC 系统结合,以使车辆在交通信号灯或其他条件下停止在前车的后面,并在前方车辆开始移动时再次继续行驶。由于 ACC 系统是从驾驶员手中获得控制权的,它的行为在一定程度上与驾驶员的行为类似,这也变相的减少了驾驶员的精神消耗。此外,由于需要考虑约束条件,PID 控制器等经典控制器是没办法应用的。我有尝试使用线性二次调节器控制器(LQR)进行控制,发现 LQR 会使得系统的响应更慢。除此之外,有两种方法可以为具有约束的线性系统设计控制器:抗饱和控制和模型预测控制(MPC)。前者在单输入单输出(SISO)的情况下表现出足够的性能,而 MPC 在复杂的约束多变量(多输入多输出或 MIMO)控制问题的领域中表现更为出色。MPC 的其它优势包括:闭环 MPC 的稳定性和可行性保障,在每一时刻都能求解最优问题。因此控制器就可以根据具体的工作状况,也就是交通状况进行控制。ACC 系统中的 MPC 是能够获得高控制性能的,因为可以根据各种驾驶情况直观灵活地考虑并调整权重参数。在本文中,不考虑车辆动力学,因为这涉及到了发动机和轮胎模型,需要从中提取数据以包含在整个系统中,这会使得设计复杂化。

2.2 车辆模型

自适应巡航车辆和目标前车的模型如图 2 所示，具有相对距离。由于 ACC 的目的是保持自适应巡航车辆和目标前车之间的期望距离，因此需要考虑以下问题：



- 距离误差 δd ，定义为车辆间距离 d 和期望距离 d_r 之间的差，其中 $\delta d = d - d_r$ 。此误差应该收敛到零。
- 速度误差 δv ，定义为目标前车速度 v_p 和自适应巡航车辆速度 v_h 之间的差。

这个误差也应该收敛到零。

- 自适应巡航车辆的加速度 \dot{v}_h ，它也应该收敛到零。

车辆动力学模型也被考虑用来设计 MPC 和分析控制器性能。自适应巡航车辆的纵向动力学如下：

$$m\dot{v}_h = ma_f - r_{travel}$$

式中 m 是车辆的质量， a_f 是转换为加速度的自适应巡航车辆的牵引力， r_{travel} 是由几个因素组成的行驶阻力。一般来说，驱动动力学可以描述为一个常微分方程，如下所示：

$$\begin{aligned} \dot{v}_h &= f_{act}(x_f, u) \\ a_f &= h_{act}(v_h) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $v_h \in \mathbb{R}^{n_f}$ ， $u \in \mathbb{R}$ 分别是驱动系统的状态和输入， u 是 ACC 控制器计算的加速指令，系统的输出是 $y = a_f$ 。需要注意的是，由于采用的是简单模型，因此忽略了 r_{travel} ，因为它包含了数个特定于车辆的因素。对于 ACC 系统的模型，采用两个主要状态变量， δd 和 δv 。在 δd 中定义的变量 d_r 是基于 δd 给出的恒定时间车距得到的。

$$d_r = T_{hw}v_h + d_0 \quad (2)$$

其中 T_{hw} 是指恒定时间车头时距（自适应巡航车辆到达目标车辆当前位置所需的时间）， d_0 是指安全裕度的停车距离。不考虑目标车辆停止时自适应巡航车辆完全停止的情况，因此将 d_0 设为零。现在我们将模型的状态变量定义为：

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3^T]$$

其中有 $x_1 = \delta d$ ， $x_2 = \delta v$ ， $x_3 = \dot{v}_h$

状态空间模型可以写成：

$$\dot{v}_h = A_f(t)v_h + B_f(t)u$$

$$a_f = C_f v_h \quad (3)$$

有 $v_h \in \mathbb{R}$, i. e. $n_f = 1$ 和

$$\begin{aligned} A_f(t) &= -\frac{1}{T_{eng}} \\ B_f(t) &= -\frac{K_{eng}(t)}{T_{eng}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$C_f = 1$$

T_{eng} 是发动机加速的时间常数； $K_{eng}(t)$ 是依赖于时间的稳态增益。在方程 (1) 中，动力学被分离为加速和减速侧，并简单地建模为一阶延迟系统。因此，具有三个状态的整体简化线性状态空间模型可以写为

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u \quad (5)$$

$$y = Cx \quad (5)$$

$$\text{其中 } x \in \mathbb{R}^3, A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -T_{hw} \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & A_f(t) \end{bmatrix}, B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_f(t) \end{bmatrix}$$

在这个模型中，A 的秩=2，这意味着定义的系统是不可控的。在这种情况下，并非所有输入都将所有状态转换为零状态或任何其他状态。由于只能直接控制自适应巡航车的速度，因此系统的可控性并不重要。另一个状态变量 δv 是与 v_h 和 v_p 有关的，方程 (5) 将用于我们的 MPC 问题。对于非线性系统，则需要围绕平衡对系统进行线性化。但是，由于我们只考虑线性系统，所以我们直接将系统从连续时间离散化为离散时间。在 MATLAB 中，这是使用 c2d 命令完成的。因此，可以得到以下离散模型：

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= \Pi(t)x_t + \Gamma(t)u_t \\ y_t &= C_d x_t \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\Pi(t) = (e^{A(t)T_s})$, $\Gamma(t) = \int_0^{T_s} e^{A(t)s} ds \cdot B(t)$ 和 $C_d = C$, T_s 是采样时间。

3 算法设计

在本节中设计了一种模型预测控制方法，以保持目标车辆和自适应巡航车辆之间的距离恒定。考虑了不同的 MPC 设计方法。我们使用基于状态的 MPC 系统调节方法。为了在每次迭代中解决 MPC 问题，定义了一般成本函数。该成本函数定义如下：

$$\begin{aligned} V_N(x_0, u) &= \sum_{k=0}^{N-1} \{l(x(k), u(k))\} + V_f(x(N)) \\ \text{s. t. } &u \in \mathbb{U}, x \in \mathbb{X} \end{aligned} \quad (7)$$

对于给定的控制输入命令 $u(k)$ ，必须控制 δd 、 δv 和 v_h 以收敛到原点。为了满足车辆之间所需的距离和速度，需要设置条件来限制所考虑的状态。由于这里的 ACC 系统是一个舒适系统，因此加速度需要限制在 $\dot{v}_{h_{min}} = u_{min} =$

$-3.0m/s^2$ 。然而，最大加速度取决于 v_p 。由于车辆之间发动机的性质不同，可能无法实现相同的加速度。因此，最大加速度 $a_{h_{max}}$ 是有界的。由于采用了 MPC 问题， v_h 和 v_p 之间的关系是线性关系，因此 $\dot{v}_{h_{max}} = 3(1 - 0.025 \cdot$

$v_h)m/s^2$ 。假设 $v_h = 40m/s$ ，则 $\dot{v}_{h_{max}} = 0$ 。此外，在加速度变化率上添加了一个约束， $|\Delta \dot{v}| \leq 5m/s^3$ ，以最小化加速度。最后，最小 d 应大于 5 m，以避免与前面的目标车辆发生碰撞。状态边界定义如下：

- 最大和最小 v_h ：这里只考虑自适应巡航车辆的纵向运动。
- 最大和最小 v_p ：这里也只考虑目标前车的纵向运动。此外，需要假设最大 v_h 与 v_p 相同，且两者都在同一方向上移动。
- 由于不考虑走停功能，因此将 v_p 的下限设置为 15 m/s。
- 最大 d 是雷达的最大范围。

此外，控制器单元上也有约束，包括了车辆的加速度不应超过 $5m/s^2$ ，减速度应大于 $-3.0m/s^2$ 。输入边界可以写成如下：

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} u(k) \leq \begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

注意：在仿真中， v_p 被视为常数。因此，唯一采用的约束是 (6) 和 (9)，而忽略状态约束。每次迭代要求解的 MPC 优化问题由方程 (7) 表示，因此给出如下：

$$l(x(k), u(k)) = x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k) \quad (9)$$

$$V_f(x(N)) = x(N)^T P x(N)$$

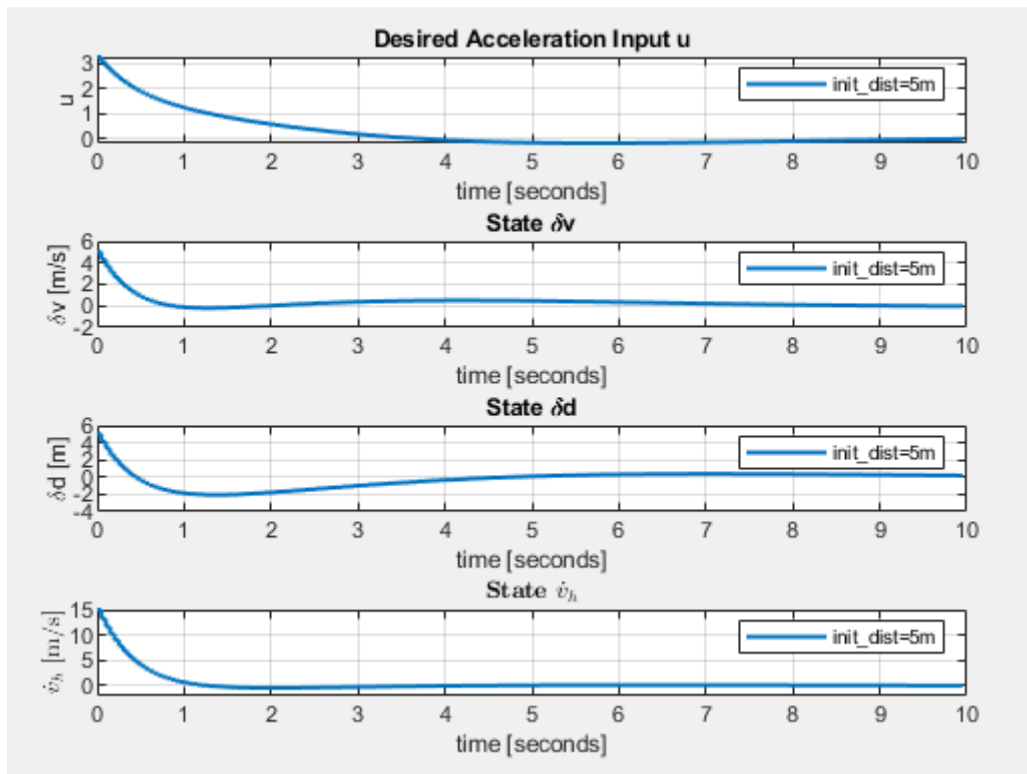
其中 $Q = I$ ， $R = 1$ ，是离散代数 Riccati 方程(DARE)的解。在这种情况下， P 、 Q 和 R 是正定的。以迭代方式获得 R 和 Q 的值。

4 仿真结果

4.1 控制器输出

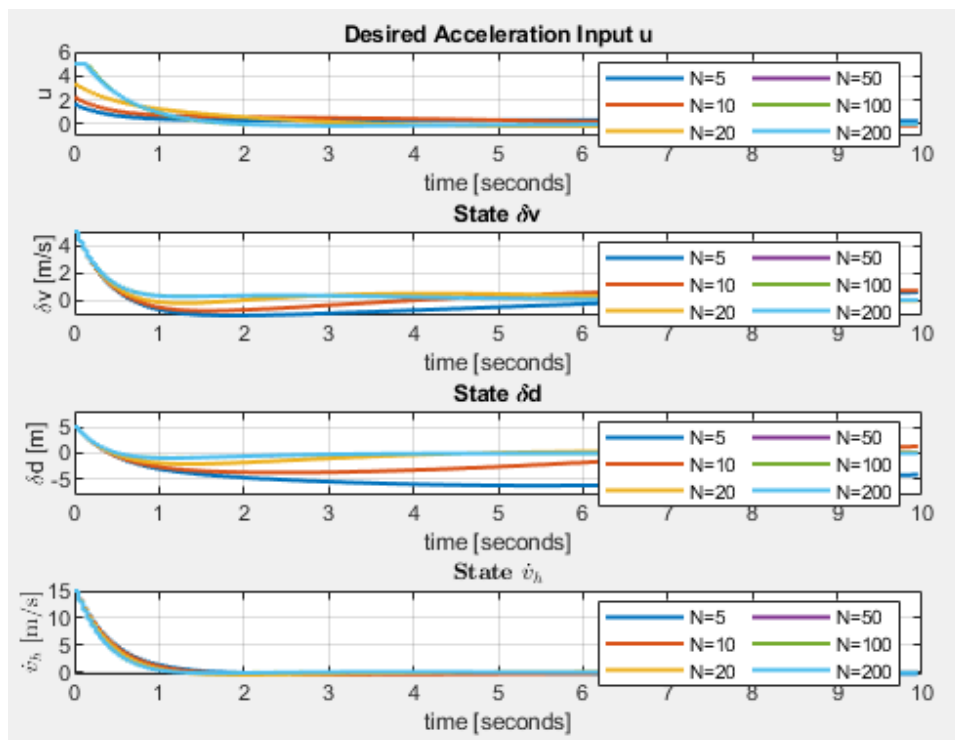
如图所示，MPC 控制器能够最小化 d 。- d 并不意味着车辆与另一辆车相撞，它意味着保持距离（等于指定限制，例如 4m）与实际距离之间的差异为零。 v_p 保持 15 m/s 的恒定速

度。 v 和 v_h 也在短时间内收敛到零。 $-v$ 意味着两辆车以零速度误差朝着彼此移动，这意味着它们在一段时间后会以相同的速度行驶。



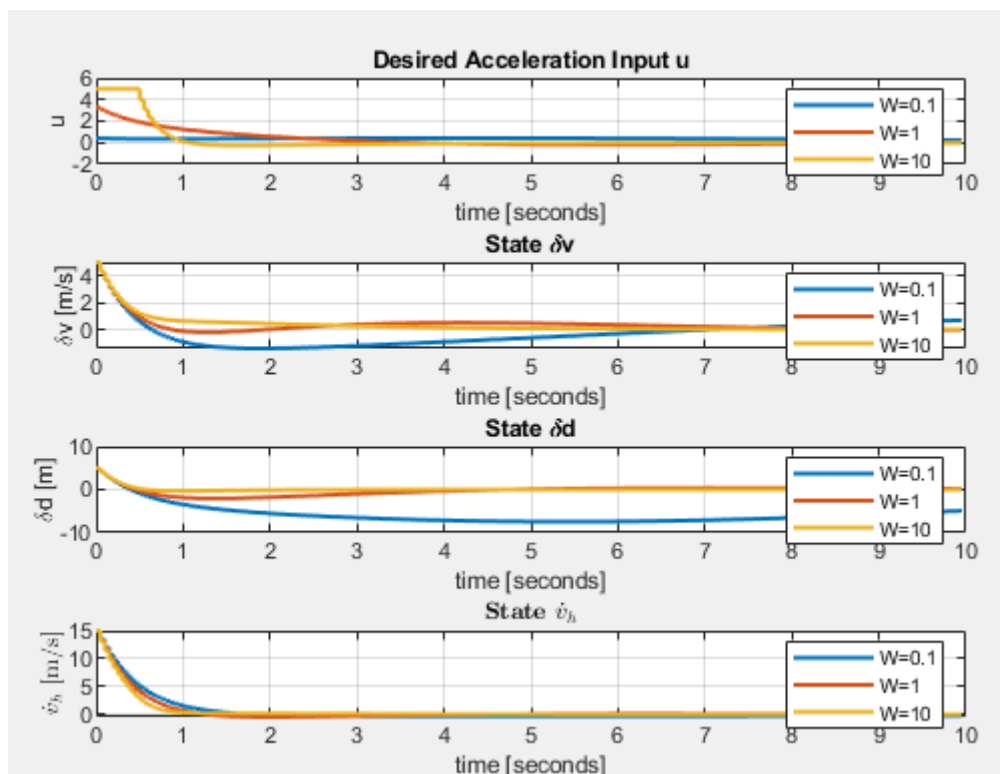
4.2 N 的参数变化

N 的参数表示在 MPC 中不同的预测范围。对于 $N = 5$ 和 $N = 10$ 的低预测范围，控制器表现不佳且不稳定。对于 $N = 20$ 及以上的范围，控制器能够达到稳定。但是选择一个非常大的范围会增加计算时间，因此在例子中，选择了 $N = 20$ 的可行预测范围。



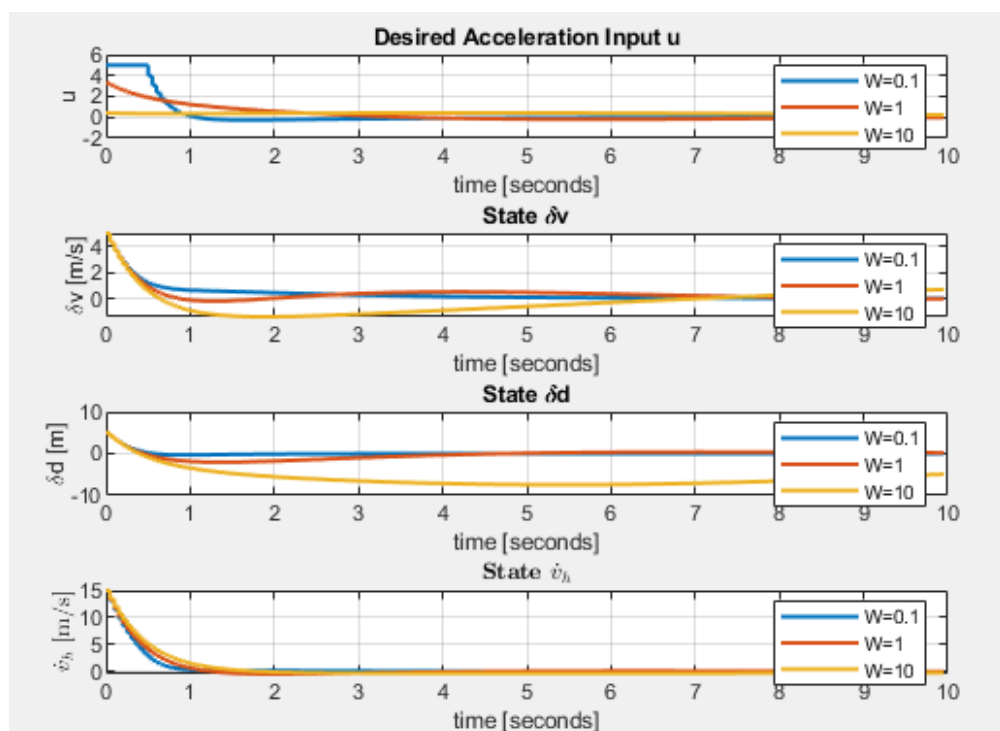
4.3 Q 的参数变化

下图显示了通过改变状态权重 Q 得到的不同结果。可以看出，对于权重 $Q = I$ ，控制器输出能够以舒适的方式实现零误差。而对于 $Q = 0.1 * I$ ，控制器更具侵略性，尽管满足约束条件，但对于舒适的驾驶来说并不是首选。



4.4 R 参数变化

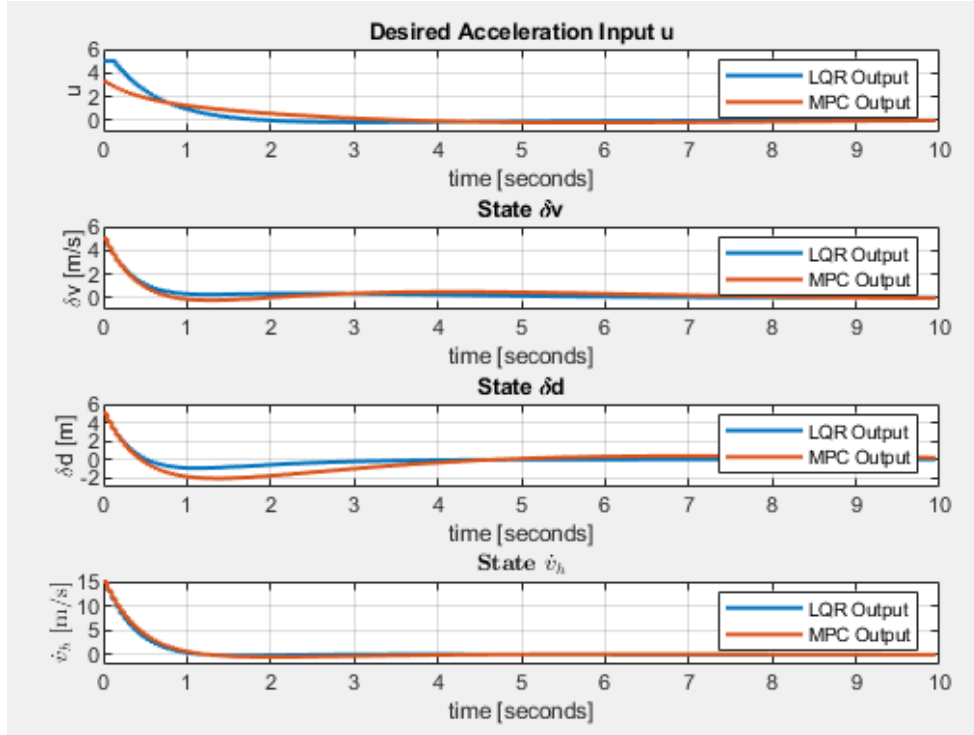
同样适用于改变权重 R 。如图所示，最佳控制器为 $R = 1$ 。



因此，最后使用权重 $Q = I$ 和 $R = 1$ ，可以实现适合 ACC 系统的控制器。

4.5 LQR 与 MPC 的对比

如图所示，LQR 会更快将结果收敛到期望结果，MPC 则会慢一些，但综合舒适性来说，MPC 更适合应用于 ACC 系统。



5 总结、心得、建议

在本文中，我为 ACC 系统实现了一个简单的 MPC 控制器。控制器能够达到所需的稳定性，并确保在短时间内将汽车之间的距离最小化。在比较 LQR 和 MPC 控制器的情况下，LQR 的性能更好，因为它与 MPC 相比，它能够在更短的时间内减小误差。然而，这不是最优的选择，因为它可能引起驾驶员和乘客的不适。因此，在这种情况下，MPC 控制器将是首选。随着状态约束的实施，控制器将能够在各种情况下实现所需的稳定性。特别是在车辆之间距离较大的情况下，这会破坏设备的稳定性，并且控制器无法实现稳定性。然而，在本车与前车的距离差较小的情况下控制器的工作良好。该控制器还针对不同的预测范围进行了测试，并且在 $N = 20$ 的范围内表现良好，超出该范围后并没有观察到明显的改进，范围的增大只会增加计算时间。对于未来的研究，可以包含状态约束并使用车辆之间的不同初始距离进行测试，这能够提高控制器的鲁棒性并使其更接近实际场景。此外，控制器可以实现可变 v_p ，并验证当前车加速时，控制器能够适应并保持相同的速度，这是 ACC 系统的最终目标。模型对于给定的任务和初始条件是准确的，由于模型的简单性，可以快速完成优化并获得满意的结果。

6 参考文献

- [1] Al-Gabalawy, Mostafa, Nesreen S. Hosny, and Abdel-hamid S. Aborisha. "Model predictive control for a basic adaptive cruise control." *International Journal of Dynamics and Control* 9.3 (2021): 1132-1143.
- [2] Bageshwar, Vibhor L., William L. Garrard, and Rajesh Rajamani. "Model predictive control of transitional maneuvers for adaptive cruise control vehicles." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 53.5 (2004): 1573-1585.
- [3] 辛鹏. 自动驾驶车辆的路径跟踪模型预测控制方法研究. MS thesis. 兰州理工大学, 2021.
- [4] 黄升宇. 基于模糊 MPC 算法的自适应巡航控制系统研究. MS thesis. 湖南大学, 2012.
- [5] 孙银健. 基于模型预测控制的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制算法研究. Diss. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [6] 孙小雨. 基于模型预测控制的车辆协同式自适应巡航控制. MS thesis. 哈尔滨工业大学, 2018.