

混合车队编队一致性验证实验

一、实验目的

验证满足条件的混合车队可以实现编队一致性。

二、实验原理




1. 混合车队中车辆的分类

混合车队中的车辆按照位置进行分类，包括两类车辆：领导车辆（**leader**）和跟随车辆（**follower**），参考车辆的位置和速度一直是理想的位置和速度（即目标位置和目标速度），而跟随车辆的位置和速度起初是随机的。

混合车队中的车辆按照是否受控和网联进行分类，包括三类车辆：网联受控车辆、网联不受控车辆和不网联不受控车辆，网联车辆是指可以收到其他网联车辆的信息（包括速度、位置等信息）并且可以将自己的信息传递给其他车辆的车辆；受控车辆是指收到指令并及进行执行的车辆；由此可以组合出三类车辆。

表 1 将 **reference** 和 **follower** 两大类车辆的图示进行了说明，以便于后文的区分。

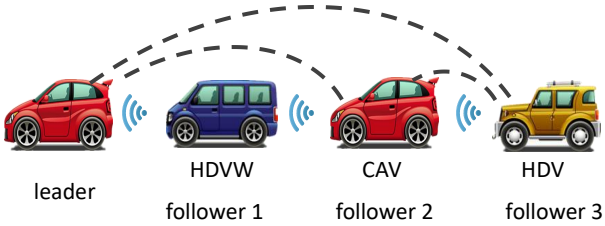
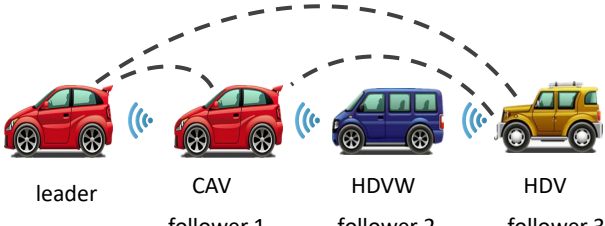
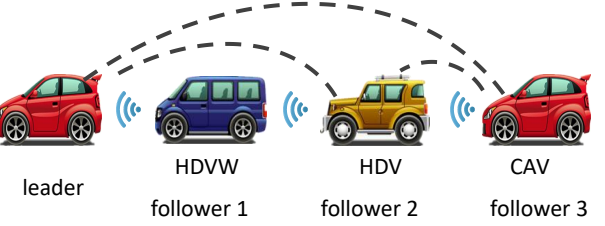
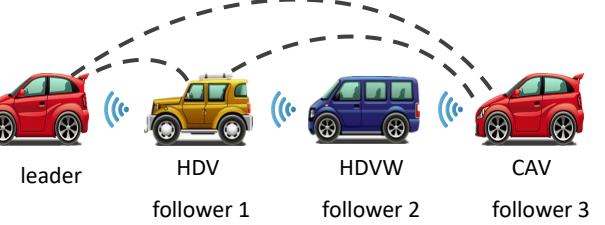
表 1 车辆图示说明

领导车辆（ leader ）		
跟 随 车 辆 （ follower ）	网联受控 （ CAV ）	
	网联不受控 （ HDV ）	
	不网联不受控 （ HDVW ）	

2. 车队描述

本实验中的混合车队一共有四辆车，其中第一辆车是 **leader**，其他三辆车的位置不确定，具体来说可以将该车队分成四种情况讨论。车队的排列和说明如表 2 所示，在车队的排列图中，蓝色线代表雷达跟踪，黑色虚线代表无线传递信息。

表 2 混合车队排列说明

编号	车队排列	数学模型	参数需满足的条件 1	参数需满足的条件 2	参数需满足的条件 3
1	 <p>leader HDVW CAV HDV</p> <p>follower 1 follower 2 follower 3</p>	$\ddot{\tilde{p}}_2 = a_2 = k_{p2}(e_{CAV-P}\tilde{p}_1 - 3\tilde{p}_2 + \tilde{p}_3) + k_{v2}(e_{CAV-V}\dot{\tilde{p}}_1 - 3\dot{\tilde{p}}_2 + \dot{\tilde{p}}_3)$ $\ddot{\tilde{p}}_3 = a_3 = k_{p3}(\tilde{p}_2 - 2\tilde{p}_3) + k_{v3}(\dot{\tilde{p}}_2 - 2\dot{\tilde{p}}_3)$	$w_{11}^3 k_{v2}^2 + (k_{p2}^2 - 6k_{v2}^2 k_{p2})w_{11}^2 - (12k_{p2}^2 k_{v2}^2 + 6k_{p2}^3)w_{11} > 0$ $w_{11} = \sqrt{\frac{6k_{p2}^3 k_{v2}^2 + k_{p2}^4}{k_{v2}^4}} - \frac{k_{p2}^2}{k_{v2}^2}$ $w_{12}^3 k_{v3}^2 + (k_{p3}^2 + 3k_{v3}^4 - 4k_{v3}^2 k_{p3})w_{12}^2 + (6k_{p3}^2 k_{v3}^2 - 4k_{p3}^3)w_{12} + 3k_{p3}^4 > 0$ $w_{12} = \sqrt{\frac{4k_{p3}^3 k_{v3}^2 + k_{p3}^4}{k_{v3}^4}} - \frac{k_{p3}^2}{k_{v3}^2}$	$k_{p2} > k_{p3} > 0$ $k_{v2} > k_{v3} > 0$	
2	 <p>leader CAV HDVW HDV</p> <p>follower 1 follower 2 follower 3</p>	$\ddot{\tilde{p}}_1 = a_1 = k_{p1}(-2\tilde{p}_1 + \tilde{p}_3) + k_{v1}(-2\dot{\tilde{p}}_1 + \dot{\tilde{p}}_3)$ $\ddot{\tilde{p}}_3 = a_3 = k_{p3}(\tilde{p}_1 + e_{HDV-P}\tilde{p}_2 - 3\tilde{p}_3) + k_{v3}(\dot{\tilde{p}}_1 + e_{HDV-V}\dot{\tilde{p}}_2 - 3\dot{\tilde{p}}_3)$	$w_{21}^3 k_{v1}^2 + (k_{p1}^2 - 4k_{v1}^2 k_{p1})w_{21}^2 - 4k_{p1}^3 w_{21} > 0$ $w_{21} = \sqrt{\frac{4k_{p1}^3 k_{v1}^2 + k_{p1}^4}{k_{v1}^4}} - \frac{k_{p1}^2}{k_{v1}^2}$ $w_{22}^3 k_{v3}^2 + (k_{p3}^2 - 4k_{v3}^2 k_{p3})w_{22}^2 - 4k_{p3}^3 w_{22} > 0$ $w_{22} = \sqrt{\frac{4k_{p3}^3 k_{v3}^2 + q^4}{k_{v3}^4}} - \frac{k_{p3}^2}{k_{v3}^2}$	$k_{p1} > k_{p3} > 0$ $k_{v1} > k_{v3} > 0$	$0 < e_{HDV-P} < 1.5$ $0 < e_{HDV-V} < 1.5$ $0 < e_{CAV-P} < 1.5$
3	 <p>leader HDVW HDV CAV</p> <p>follower 1 follower 2 follower 3</p>	$\ddot{\tilde{p}}_2 = a_2 = k_{p2}(e_{HDV-P}\tilde{p}_1 - 3\tilde{p}_2 + \tilde{p}_3) + k_{v1}(e_{HDV-V}\dot{\tilde{p}}_1 - 3\dot{\tilde{p}}_2 + \dot{\tilde{p}}_3)$ $\ddot{\tilde{p}}_3 = a_3 = k_{p3}(\tilde{p}_2 - 2\tilde{p}_3) + k_{v3}(\dot{\tilde{p}}_2 - 2\dot{\tilde{p}}_3)$	$w_{31}^3 k_{v2}^2 + (k_{p2}^2 - 6k_{v2}^2 k_{p2})w_{31}^2 - (12k_{p2}^2 k_{v2}^2 + 6k_{p2}^3)w_{31} > 0$ $w_{31} = \sqrt{\frac{6k_{p2}^3 k_{v2}^2 + k_{p2}^4}{k_{v2}^4}} - \frac{k_{p2}^2}{k_{v2}^2}$ $w_{32}^3 k_{v3}^2 + (k_{p3}^2 + 3k_{v3}^4 - 4k_{v3}^2 k_{p3})w_{32}^2 + (6k_{p3}^2 k_{v3}^2 - 4k_{p3}^3)w_{32} + 3k_{p3}^4 > 0$ $w_{32} = \sqrt{\frac{4k_{p3}^3 k_{v3}^2 + k_{p3}^4}{k_{v3}^4}} - \frac{k_{p3}^2}{k_{v3}^2}$	$k_{p3} > k_{p2} > 0$ $k_{v3} > k_{v2} > 0$	$0 < e_{CAV-V} < 1.5$ $e_{HDV-P} < e_{CAV-P}$ $e_{HDV-V} < e_{CAV-V}$
4	 <p>leader HDV HDVW CAV</p> <p>follower 1 follower 2 follower 3</p>	$\ddot{\tilde{p}}_1 = a_1 = k_{p1}(-2\tilde{p}_1 + \tilde{p}_3) + k_{v1}(-2\dot{\tilde{p}}_1 + \dot{\tilde{p}}_3)$ $\ddot{\tilde{p}}_3 = a_3 = k_{p3}(\tilde{p}_1 + e_{CAV-P}\tilde{p}_2 - 3\tilde{p}_3) + k_{v3}(\dot{\tilde{p}}_1 + e_{CAV-V}\dot{\tilde{p}}_2 - 3\dot{\tilde{p}}_3)$	$w_{41}^3 k_{v1}^2 + (k_{p1}^2 - 4k_{v1}^2 k_{p1})w_{41}^2 - 4k_{p1}^3 w_{41} > 0$ $w_{41} = \sqrt{\frac{4k_{p1}^3 k_{v1}^2 + k_{p1}^4}{k_{v1}^4}} - \frac{k_{p1}^2}{k_{v1}^2}$ $w_{42}^3 k_{v3}^2 + (k_{p3}^2 - 4k_{v3}^2 k_{p3})w_{42}^2 - 4k_{p3}^3 w_{42} > 0$ $w_{42} = \sqrt{\frac{4k_{p3}^3 k_{v3}^2 + q^4}{k_{v3}^4}} - \frac{k_{p3}^2}{k_{v3}^2}$	$k_{p3} > k_{p1} > 0$ $k_{v3} > k_{v1} > 0$	

3. 模型构建

整体来看，任意车辆的加速度满足下式：

$$\dot{v}_i = a_i = \sum_{j=0}^n k_p (p_j - p_i + \Delta_{ij}) + k_v (v_j - v_i)$$

其中， k_p, k_v 代表第 i 辆车的位置系数和速度系数， $\Delta_{ij} = p_i^* - p_j^*$ ， p_i^* 代表第 i 辆车的期望位置， p_j^* 代表第 j 辆车的期望位置。 Δ_{ij} 的计算要按照下标的先后顺序进行计算，也就是说， $\Delta_{ij} \neq \Delta_{ji}, \Delta_{ij} = -\Delta_{ji}$ 。

接下来，编号为 2 的车队为例进行建模，建模的结果汇总到表格 2 中。

Case 2:

第一辆车（leader）的加速度满足：

$$\ddot{p}_0 = a_0 = 0$$

第二辆车（follower 1）的加速度满足：

$$\ddot{p}_1 = a_1 = k_{p1} [(p_0 - p_1 + \Delta_{10}) + (p_3 - p_1 + \Delta_{13})] + k_{v1} [(v_0 - v_1) + (v_3 - v_1)]$$

第三辆车（follower 2）的加速度可以由司机根据前车的位置、速度和加速度自行决定。

第四辆车（follower 3）的加速度满足：

$$\ddot{p}_3 = a_3 = k_{p3} [(p_0 - p_3 + \Delta_{30}) + (p_1 - p_3 + \Delta_{31}) + (p_2 - p_3 + \Delta_{32})] + k_{v3} [(v_0 - v_3) + (v_1 - v_3) + (v_2 - v_3)]$$

引入误差变量， $\tilde{p}_i(t) = p_i(t) - p_i^*(t)$ ，那么上述模型变为下述误差模型：

$$\begin{aligned} \ddot{\tilde{p}}_1 &= a_1 = k_{p1} (-2\tilde{p}_1 + \tilde{p}_3) + k_{v1} (-2\dot{\tilde{p}}_1 + \dot{\tilde{p}}_3) \\ \ddot{\tilde{p}}_3 &= a_3 = k_{p3} (\tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 - 3\tilde{p}_3) + k_{v3} (\dot{\tilde{p}}_1 + \dot{\tilde{p}}_2 - 3\dot{\tilde{p}}_3) \end{aligned}$$

由于 follower 2 不能传递准确信息给其他车辆，所以 \tilde{p}_2 和 $\dot{\tilde{p}}_2$ 为估计值，即

$$\ddot{\tilde{p}}_3 = a_3 = k_{p3} (\tilde{p}_1 + e_{HDV-P} \tilde{p}_2 - 3\tilde{p}_3) + k_{v3} (\dot{\tilde{p}}_1 + e_{HDV-V} \dot{\tilde{p}}_2 - 3\dot{\tilde{p}}_3)$$

其中， $0 < e_{HDV-P} < 1.5$ ， $0 < e_{HDV-V} < 1.5$ 。

其他编号的车队的建模过程类似，不再赘述。

三、实验内容及步骤

总的来看，本实验按照表 2 的 8 种情况进行实验，分别给定初始状态（即每辆车的速度、位置），调节参数（即 HDV 和 CAV 的速度系数和位置系数）使得车队实现编队一致性（也就是说，车队中所有车辆的速度是相等的，相邻车之间的间距是相等的）。

下面进行步骤说明：

- 1、确定 leader 的速度（该速度即车队的期望速度），给定 follower 1、follower 2 和 follower 3 的初始状态（即初始位置、速度以及加速度）；
- 2、确定参数（即速度系数和位置系数，例：在编号为 1 的车队中需要确定 k_{p2} 、 k_{v2} 、 k_{p3} 、 k_{v3} 这四个参数的值），不同编号的车队中的四个参数需要满足的条件见表 2 中的第四列（即**参数需满足的条件 1**）、第五列（即**参数需满足的条件 2**）和第六列（即**参数需满足的条件 3**）。
- 3、观察车队中车辆的轨迹，如果没有实现编队一致性，则重复步骤 2，直到实现编队一致性。

四、注意事项

车辆在行驶过程中不能发生碰撞。