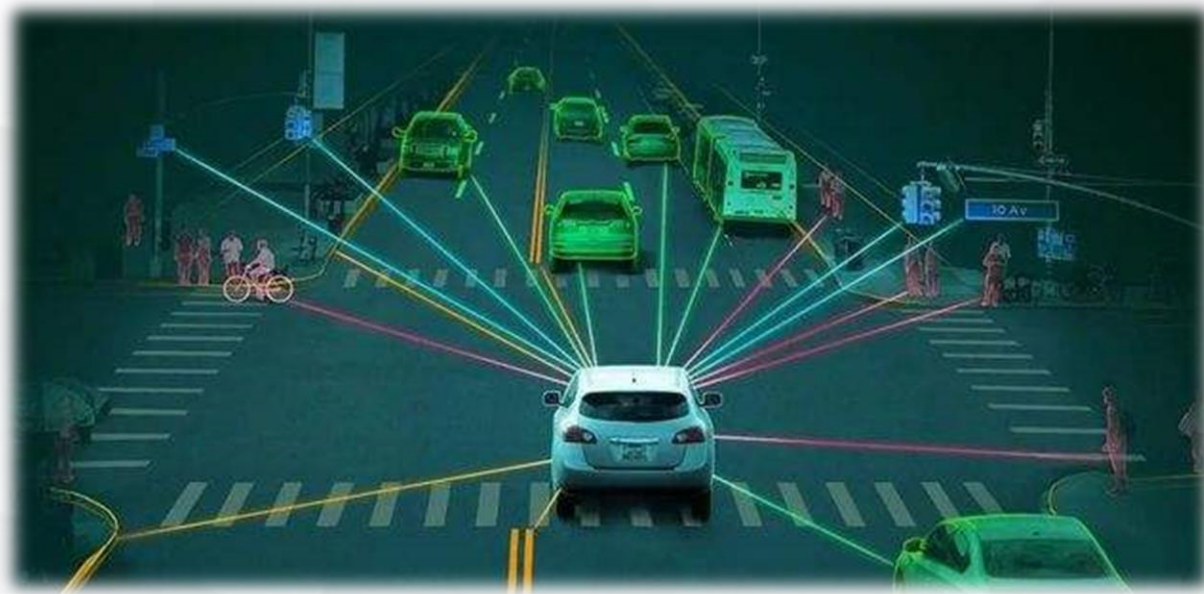


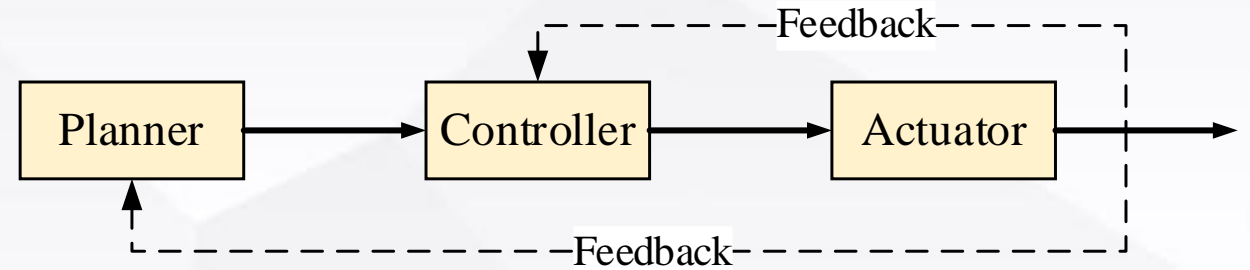
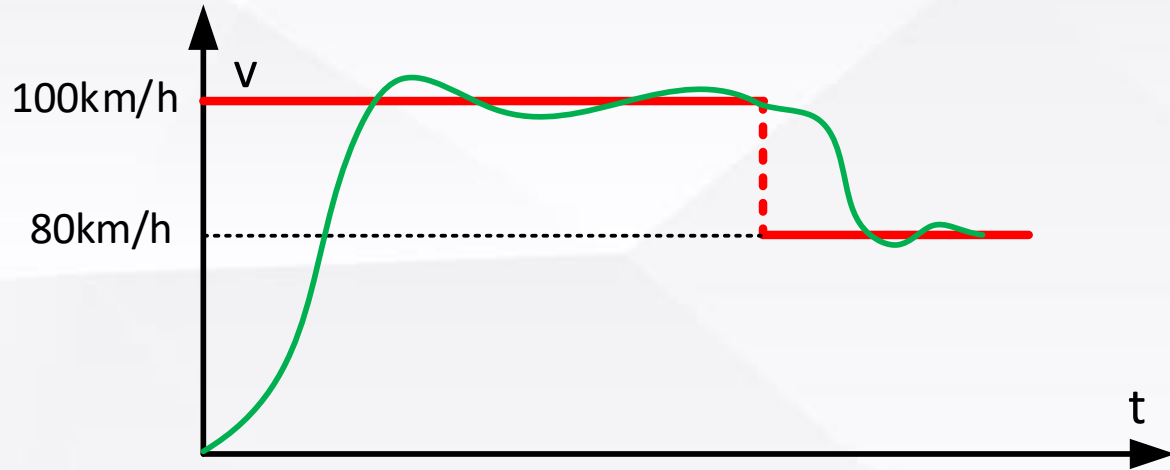
智能驾驶汽车 规划/控制算法系列术语概念解析

第10节_规划控制的开环/闭环/前馈/反馈与重规划

创作者: Ally

时间: 2023/6/11





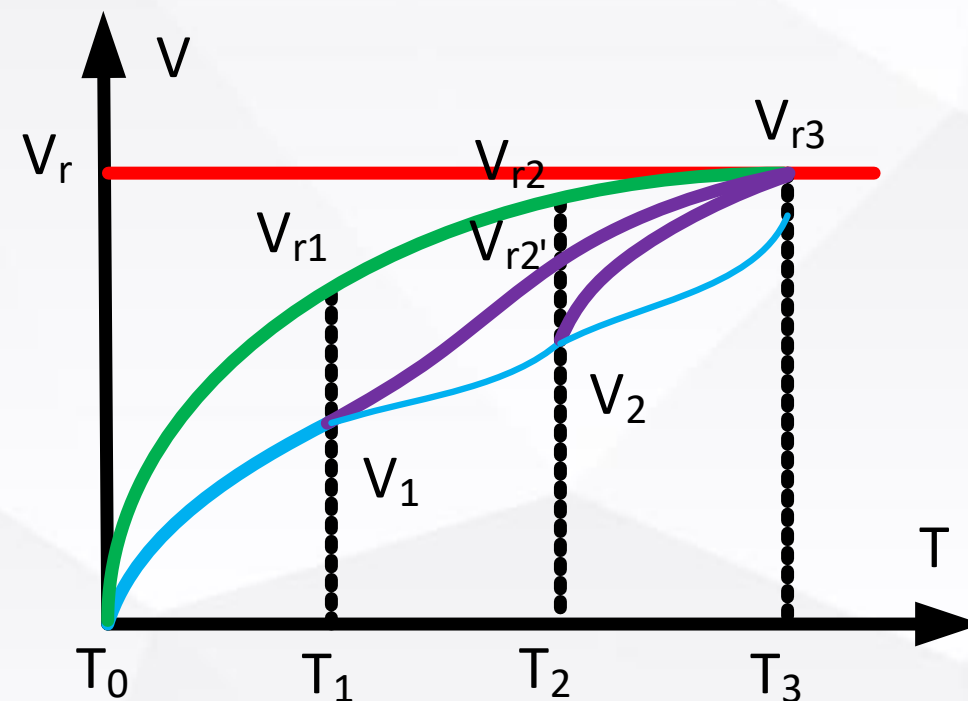
□ 驾驶员高速公路控车过程

- 当前路段道路限速100km/h，驾驶员控制车辆起步。刚开始由于车速较低，所以驾驶员深踩油门踏板。
- 随着车速逐步接近目标车速，驾驶员根据当前车速与目标车速的差值，逐步缓抬油门踏板；
- 当到达目标车速后，驾驶员轻踩油门踏板，并不时观察仪表车速，采取相应动作：如果车速超过目标车速，则松开踏板，依靠车辆惯性逐步减速；如果车速低于目标车速，则稍微增大油门，使其更加接近目标车速。
- 按照上述过程持续一段时间后，前方遇到隧道，限速为80km/h。驾驶员当前目标车速随即降低，首先松开油门，驾驶员会优先判断依靠惯性减速是否可以在进入隧道前降低至80km/h，否则会直接踩制动踏板使车速快速降低。

□ 开环、闭环及重规划

- 当前路段的限速值是一个理想达到的速度值，它不在乎当前车速是否达到、何时达到100km/h，只是作为车辆期望达到的一个目标速度，这就是规划器的开环性。
- 驾驶员观察当前实际车速就好比控制器接收系统输出的反馈信号；深踩、轻踩油门踏板和制动踏板的过程就是控制器输出控制指令的过程；这就实现了驾驶过程的闭环控制。
- 当车辆快进入隧道时，限速发生变化，这表明规划器的目标车速也应当随即发生变化。由于规划的起点并不是上周期规划的终点，可理解为重规划。

- 如图所示：在起点处，我们希望规划一条光滑的速度曲线，达到目标速度 V_r ，现有两种方案。
- 方案一是开环规划，如图中绿色曲线所示。在 T_0 时刻，先规划 $T_0 \sim T_1$ 的绿色速度曲线段，随后车辆立即响应指令。但由于执行误差，到达 T_1 时刻后车辆速度为 V_1 ，未达到理想速度 V_{r1} 。开环速度规划不会局限于此周期实际速度到底有无达到规划速度，而是继续沿着上个周期末的规划结果，以 V_{r1} 为起点，继续规划 $T_1 \sim T_2$ 时间段的光滑绿色速度曲线。以此类推，从 T_0 到 T_3 的整个规划区间就是整条速率曲线，而实际速度响应为蓝色曲线。此方案优点是曲线更加光滑，满足最优性，缺点是未考虑系统的实际响应能力。
- 方案二是闭环规划，如图中紫色曲线所示。既然是闭环，就需要引入实际速度。以 T_1 时刻为例，由于此时 $V_1 \neq V_{r1}$ ，故此时以实际速度 V_1 作为起点，重新规划一条从 V_1 到 V_{r3} 的紫色速度曲线。同理，到达 T_2 时刻后， $V_2 \neq V_{r2'}$ ，故再次以 V_2 作为起点，重新规划一条从 V_2 到 V_{r3} 的紫色速度曲线。优缺点与开环相反。
- 究竟哪种方案更优呢？实际上，两种方案在规控算法种都应该采用，只不过将他们进行了分工：（1）在规划层，除了起点以及需要重规划的特殊场景外，都应采用开环，保证规划层在综合考虑众多约束条件下，求解最优速度曲线，即绿色曲线；（2）在控制层，引入实际速度，并与规划速度共同构造加速度的反馈分量，使速度能更及时响应规划的绿色曲线。

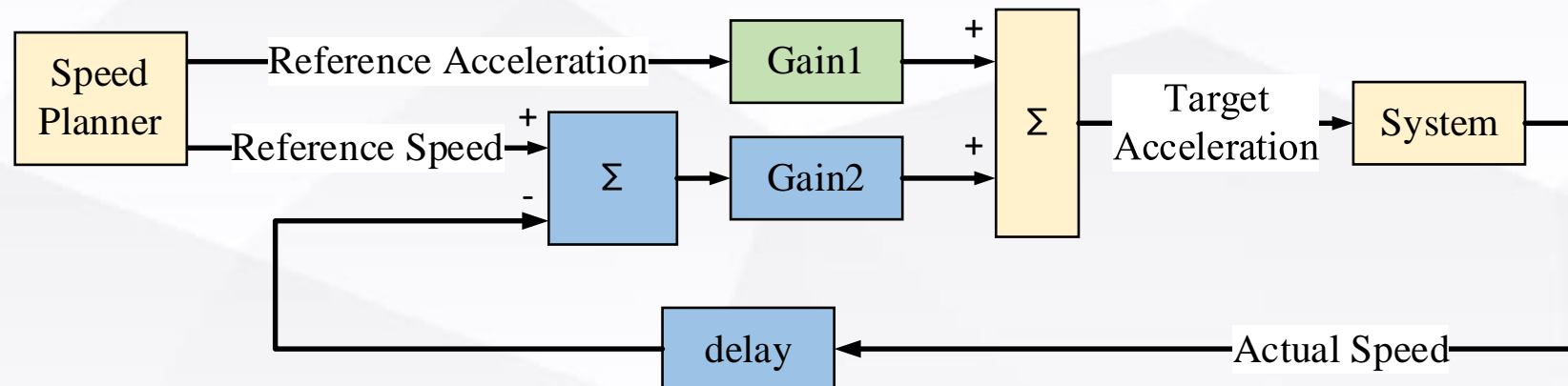


□ 规划层加速度的理解

- 规划层是开环的，不仅规划了速度，也规划了加速度，这个加速度从两方面进行理解。
- 一方面，规划加速度也需要适当参考，因为它和规划速度共同反映了当前车辆需要达到的一种理想状态，控制模块以此作为理想目标，逐步趋近达成。
- 另一方面，规划加速度不能直接用于指令输出给执行器。理由如下：如目标速度为60kph，此时速度为58kph，根据规划层的开环性可知，规划速度将首先达到60kph，此时对应的规划加速度为0。若直接将0加速度指令下发给执行器，当执行器完美响应时，则速度不再继续上升，因此最终实际车速永远停留在58kph。

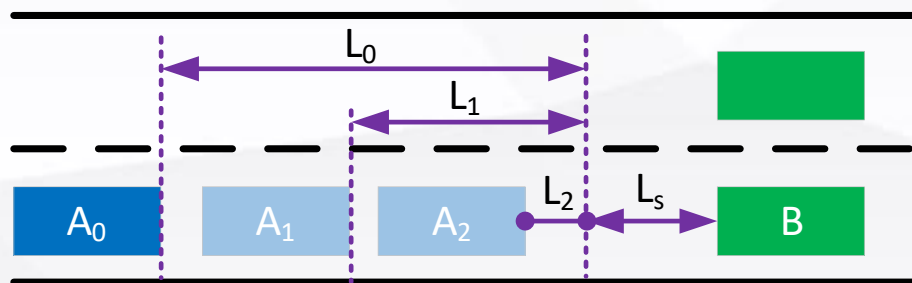
□ 加速度前馈与反馈

- 一方面，我们将规划层输出的参考加速度做一个比例增益Gain1，其结果作为目标加速度指令的一部分。由于参考加速度直接由速度规划器输出，故称之为前馈加速度；
- 另一方面，为了解决系统稳态误差影响，将系统实际响应的速度与当前实际速度作差，并再增加一个比例增益Gain2，其结果作为目标加速度指令的另一部分。由于利用了系统实际响应反馈的速度，故称之为反馈加速度。
- 综上，由加速度前馈和反馈共同构成了纵向控制模型，如下图所示。



□ 位置环

- 一般来说，我们要求跟停前方静止车时，本车车头与前车车尾的距离控制在3~4m较为合适。因此，在所有驾驶场景中，动静态跟停场景对位置的控制要求相对最高。
- 我们设主车在A0位置开始减速跟停，目标跟停位置距离前方B车的相对距离为 L_s 。
- 将上述条件输入到速度规划器，可以输出满足安全性和舒适性要求的参考速度序列，车辆执行器接受相应指令后向前运动。
- 经过单位周期后，车辆到达A1位置，距离目标位置还有 L_1 的距离，根据上述条件，继续规划速度序列，不断循环往复，也就构成了最外层的位置环。

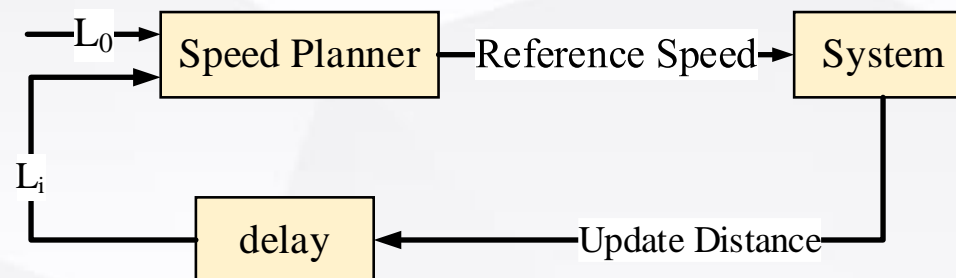


□ 速度环

- 在定速巡航等场景中，对位置控制要求较低，而对速度控制要求更高，故此时会产生速度环。
- 将位置环中与目标位置相关的变量替换为与目标速度的变量，即可将该图整体替换为速度环的示意图。

□ 加速度环

- 在起步加速至目标车速的过程中，尽可能以最大加速度（如1.5m/ss）不断靠近目标车速，这个过程常需要加速度进行精确控制，以期能够及时、足量产生加速度，此时则构成了加速度环。



- 绿色曲线表示规划的速度曲线，蓝色表示车辆实际响应速度曲线
- 假设在 $T_0 \sim T_1$ 时刻，车辆正常巡航加速，实际响应速度曲线也在逐步加速。当到达 T_1 时刻后，车辆突然遇到紧急情况，例如前车急减速、邻车道突然cut in，此时需要紧急规划减速。这种情况，我们期望车辆速度能立即按照紫色曲线那样响应减速。
- $T_1 \sim T_2$ 时间段，虽然规划速度在减小，但仍大于实际车速，导致控制层的反馈加速度为正，此时前馈加速度为负，但前馈与反馈加速度两者之和可能仍为正，这就导致最终车辆还会继续加速。
- 因此，即使抛开系统时延和迟滞的影响，实际速度曲线仍会继续上升至 V_2 ， V_3 ，这样就错过了减速的最佳时机，可能导致制动不足而与前车相撞。
- 因此在规划层，为了避免上述情况的发生，当识别到某种危险场景后，规划速度不再沿着上一周期的规划结果继续规划，而是直接从当前车速进行规划。如图2所示：绿色虚线表示识别到某种危险场景后规划的曲线， T_1 时刻规划速度发生跳变，从 V_{r1} 跳变到 V_1 开始规划。如此一来，最终实际车速响应可能就类似按照 T_1 之后的蓝色曲线。
- 综上，重规划都是针对一些特殊场景，需要尽可能降低系统时延和迟滞带来的加速或制动响应不足问题。

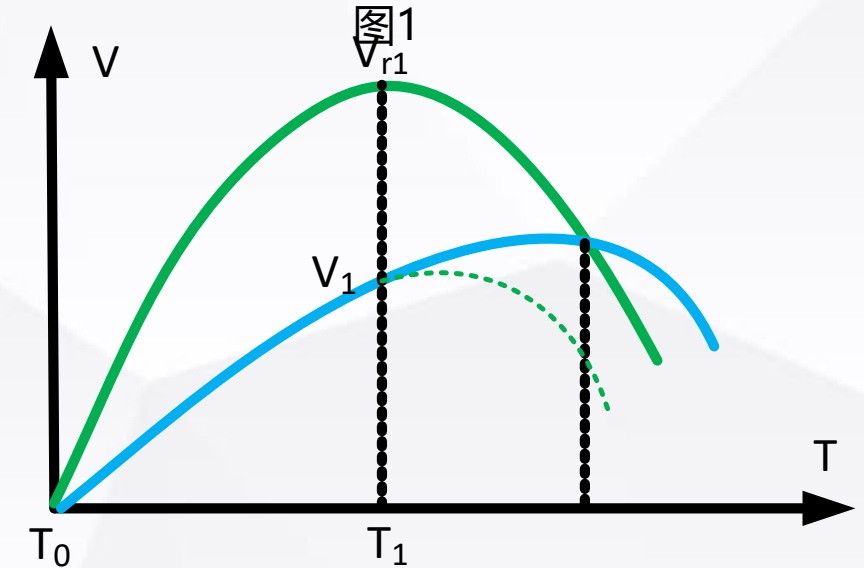
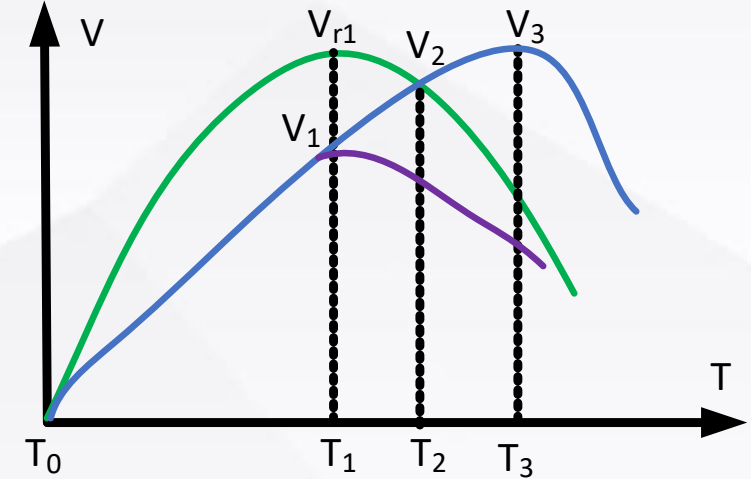


图2