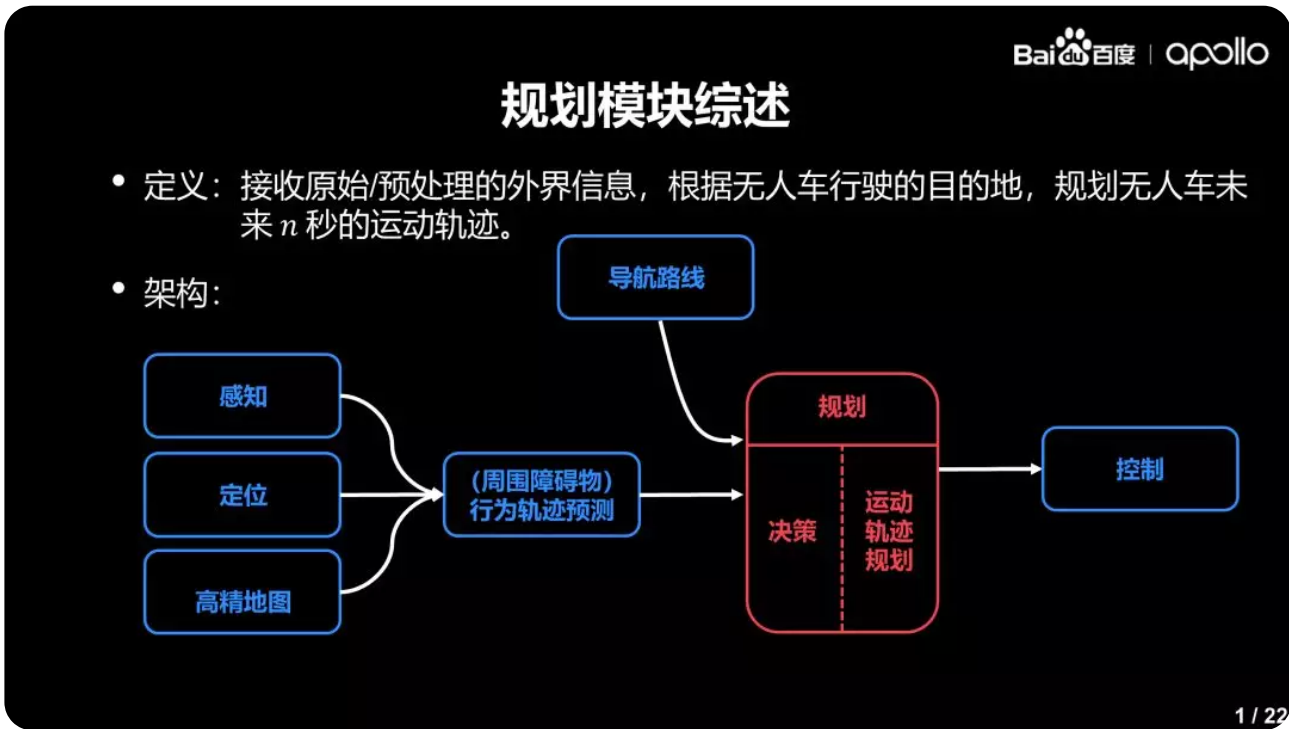


Apollo公开课 | Apollo运动轨迹规划技术

本节主要和大家分享一下Apollo运动轨迹规划方面的一些新进展。运动轨迹规划或者优化属于无人车规划模块。规划模块的定义是接收原始/预处理的外界信息，根据无人车行驶的目的地，规划无人车未来 n 秒的运动轨迹。



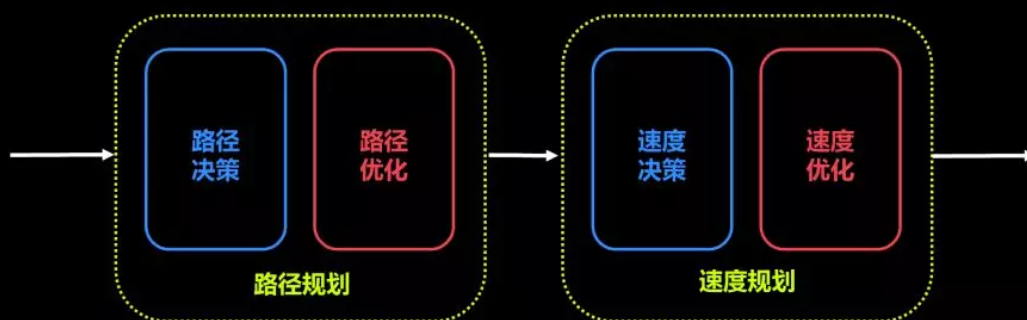
▲ 规划模块综述

可以看到**规划模块的输入包括原始感知、定位、高精地图、导航、路线**等信息，也有一些预处理过对于周围障碍物的运动行为轨迹预测的信息，它输出给车辆控制模块，执行左/右转、刹车、油门等操作。规划模块的特点难点是接收离散的信息输入，输出必须是能用数学语言表达的连续运动轨迹。正因为此特点，规划模块分为两部分，一部分是决策模块，另外一部分运动轨迹规划模块。决策模块对接上游比较发散的各种信息输入，运动轨迹规划模块输出非常具体的轨迹点。

规划模块的目标大体有三类，一是**安全**，要避免所有的碰撞和任何可能的险情；二是**高效**，在合理的时间内抵达终点/目的地；三是**舒适**，避免急转/急刹等影响体感的行为，保证良好的乘坐体验。

规划模块的结构

- 路径规划 —— 静态环境（道路，静止/低速障碍物）
- 速度规划 —— 动态环境（中/高速障碍物）
- 将规划分解为：1)决策 和 2)优化



3 / 22

▲ 规划模块的结构

整个规划分为**路径规划**和**速度规划**。路径规划主要处理类似于所谓静态管理，比如道路信息或者静止、低速、行径障碍物，通过路径绕开这些障碍物。速度规划主要考虑动态环境，比如高速行驶的时候按照固定路径走，前面有没有车，或者旁边车插进来，对于速度分配不一样。

路径规划的目标沿袭了规划模块的目标，分为完全、高效和舒适三类，如下图所示。左边这张图，如果前方有行人，按照绿色平滑轨迹无人车是可能走出来的。但是右图三条轨迹是不合理的。红色轨迹离行人太近，不能保证安全；绿色轨迹偏保守，不能保证车辆灵活；紫色轨迹这种形态给给控制模块，沿着这条路线走，其实是走不出来的，安全上存在隐患。

路径规划的目标

- 安全：避让复杂、拥挤环境下的诸多障碍物；
- 高效：保证足够的灵活性；
- 舒适：遵守车辆运动学限制，保证路径的平滑，几何形状的合理。



4 / 22

▲规划模块的目标

为了实现这些目标，需要考虑路径规划，将上游的离散输入转换为数学语言能够表达的输出，通常需要先建立参考系。在路径规划里面，通常使用**Frenet坐标系**，并把无人车、道路边界、障碍物特征、障碍物位置等都放到坐标系中。**Frenet坐标系**有两个优势，第一将复杂问题的难度降维，第二不受道路几何形状影响，更好的场景理解。

路径决策根据道路边界、障碍物特征做出大概决策，在**Frenet坐标系**里边有S轴和L轴，有其他道路边界，行驶范围信息和蓝色所标注其他障碍物信息。

有了**路径决策**之后，还要对路径进行优化。路径优化分四个步骤。

第一步将连续性问题离散化。以 Δs 为间隔采样，得到n 个点。 Δs 不能太大也不能太小，如果特别小在工程上影响速度，所以 Δs 通常设置为0.5厘米。

第二步是明确要满足的约束条件。包括三条，主车必须在道路边界内，同时不能和障碍物有碰撞；根据当前状态，主车的横向速度/加速度/加加速度有特定运动学限制；必须满足基本的物理原理。

路径优化

Baidu 百度 | apollo

2. 明确要满足的约束条件：

- 主车必须在道路边界内，同时不能和障碍物有碰撞：

$$l_i \in (l_{min}^i, l_{max}^i)$$

- 根据当前状态，主车的横向速度/加速度/加加速度有特定运动学限制：

$$l_i' \in (l_{min}'^i(S), l_{max}'^i(S)), l_i'' \in (l_{min}''^i(S), l_{max}''^i(S)), l_i''' \in (l_{min}'''^i(S), l_{max}'''^i(S))$$

- 必须满足基本的物理原理：

$$l_{i+1} = l_i + l_i' \times \Delta s + \frac{1}{2} l_i'' \times \Delta s^2 + \frac{1}{6} l_{i \rightarrow i+1}''' \times \Delta s^3$$

$$l_{i+1}' = l_i' + l_i'' \times \Delta s + \frac{1}{2} l_{i \rightarrow i+1}''' \times \Delta s^2$$

$$l_{i+1}'' = l_i'' + l_{i \rightarrow i+1}''' \times \Delta s$$

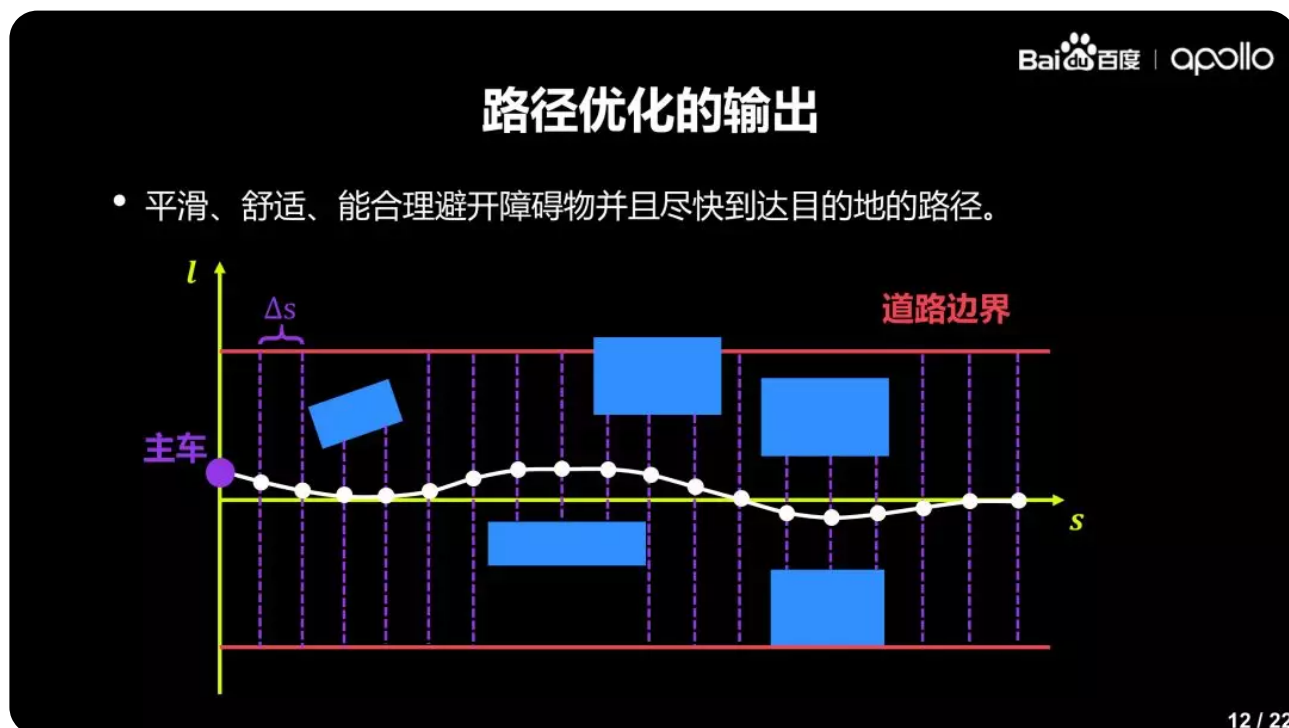
9 / 22

▲路径优化

第三步是明确要努力达到的目标。首先第一目标确保安全礼貌驾驶，不能四处乱窜，用数学语言表达相当于横向位移绝对值最小；第二确保舒适的体感，尽可能降低横向速度/加速度/加加速度。

第四步将优化问题转化为二次规划问题进行求解。转化为二次规划的问题之后，整个复杂问题简单化，运用一些现成比较好的求解二次规划算法，规划出比较合理的运动路径。

它的输出是比较平滑、舒适、能够合理避开所有障碍物尽快达目的地的路径。



▲ 路径优化的输出

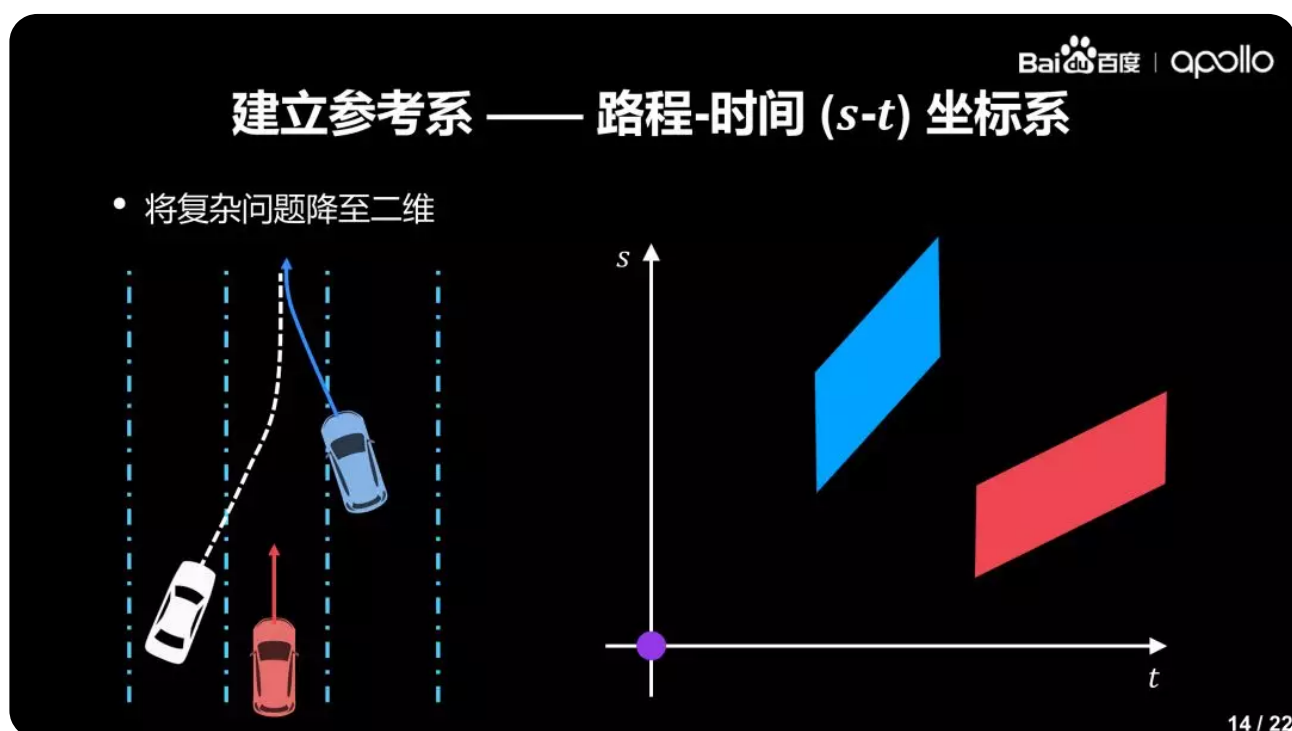
路径规划之后要进行速度规划，即如何合理分配速度走完这条路径。速度规划的目标还是刚才那三点，安全、高效和舒适。



▲ 速度规划的目标

举个简单例子。如图所示，前面这辆红色的车要进到我们车道来（白车所在车道），如果速度比较慢合理方式就是直接超过，如果急刹可能足够安全，但是体感不会舒适。相反它快速度切进来，最好避让，不然会有安全隐患。速度规划也分三步走，第一步先建立一个参考系；第二是参考系建立以后进行决策；第三是进行优化。

先看参考系，速度规划通常采用 s - t 坐标系， s 表示路程， t 表示时间。如图，本质上白色车是无人车，虚线是规划好的路径，红色、蓝色车是障碍车。可以降低成右图，把一切东西投影到白色虚线路径上，比如蓝色车速度比较快，切进来以后蓝色路径交会处比较远，因为速度快，所以斜率大，而因为切进来的时间比较早，所以 t 是比较小的，斜率比较大。本质上刚切入路径的时候实际上是点，然后会变大，离开的会变小。红色车速度比较慢，切入会在比较早位置， s 值比较小。因为切入时间比较晚，同时速度比较慢，时间切入较晚，所以 t 比较大，斜率会低一点。



▲ 建立路程-时间坐标系

有参考系以后第二步是速度决策。首先对路程和时间进行采样，然后搜索出粗略的可行路线，最后选出代价最小的一条，**代价函数**需考虑限速、碰撞、路径形状、舒适度和完成时间等。

决策完了之后进行速度优化，优化的步骤和路径优化类似，分为4步走。

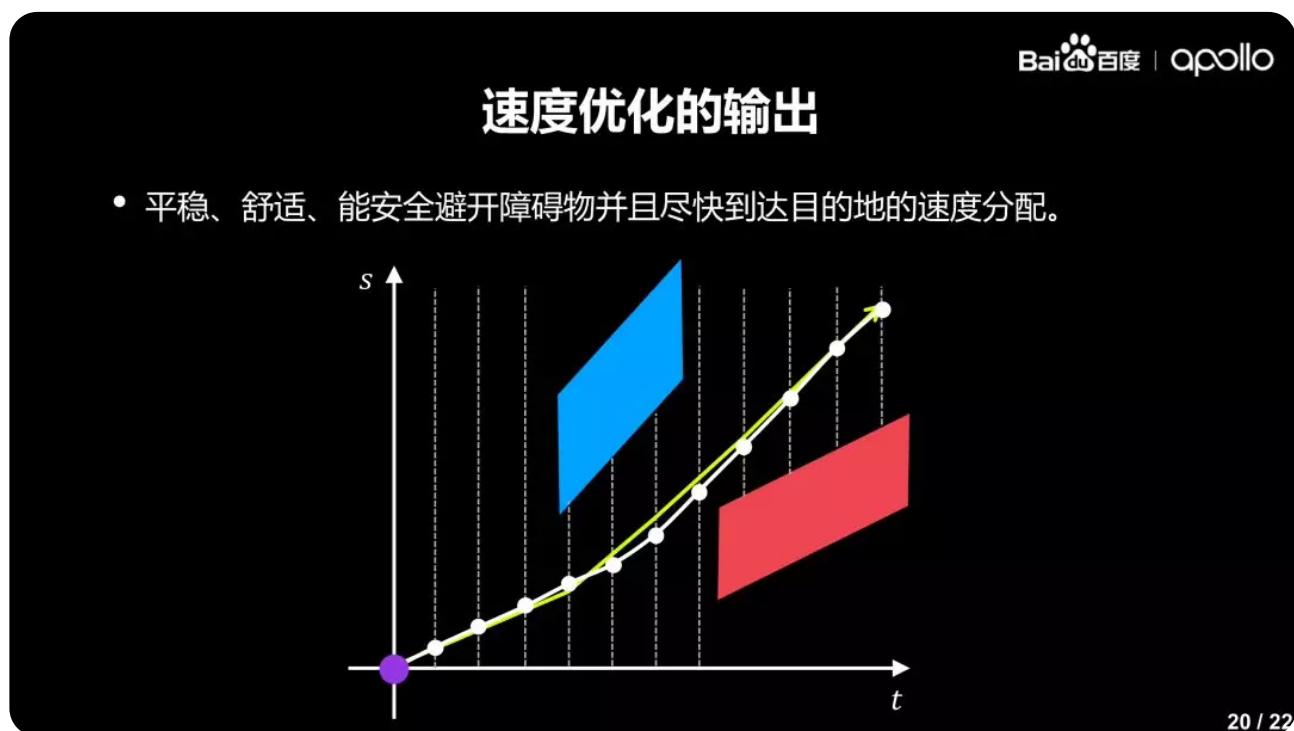
- 1) 以 Δs 为间隔采样。
- 2) 明确要满足的约束条件，考虑以下三个约束条件：

2. 根据当前状态，主车的加速度/加加速度有特定运动学限制
3. 必须满足基本的物理原理

3) 明确要努力达到的目标，主要包括以下两个方面：

1. 尽可能贴合决策时制定的速度分配
2. 确保舒适的体感，尽可能降低加速度/加加速度

4) 转化为二次规划问题，求解。



▲速度优化的输出

最后速度优化的输出结果是平稳、舒适、能安全避开障碍物并且尽快到达目的地的速度分配策略。

最后，我们看看运动轨迹规划面临的挑战，主要有四个部分，如图所示。

运动轨迹规划的挑战

- 感知/预测模块输出不准确。
- 概率化的输入信息。
- 路径规划和速度规划更紧密的耦合。
- 对于紧急状况的处理。

22 / 22

▲ 运动轨迹规划的挑战

以上就是本次关于**Apollo运动轨迹规划技术**课程的全部内容。欢迎大家提出问题，进入社群进行交流。更多相关技术干货也可以继续关注后续的课程。