

apollo 运动轨迹规划技术分享

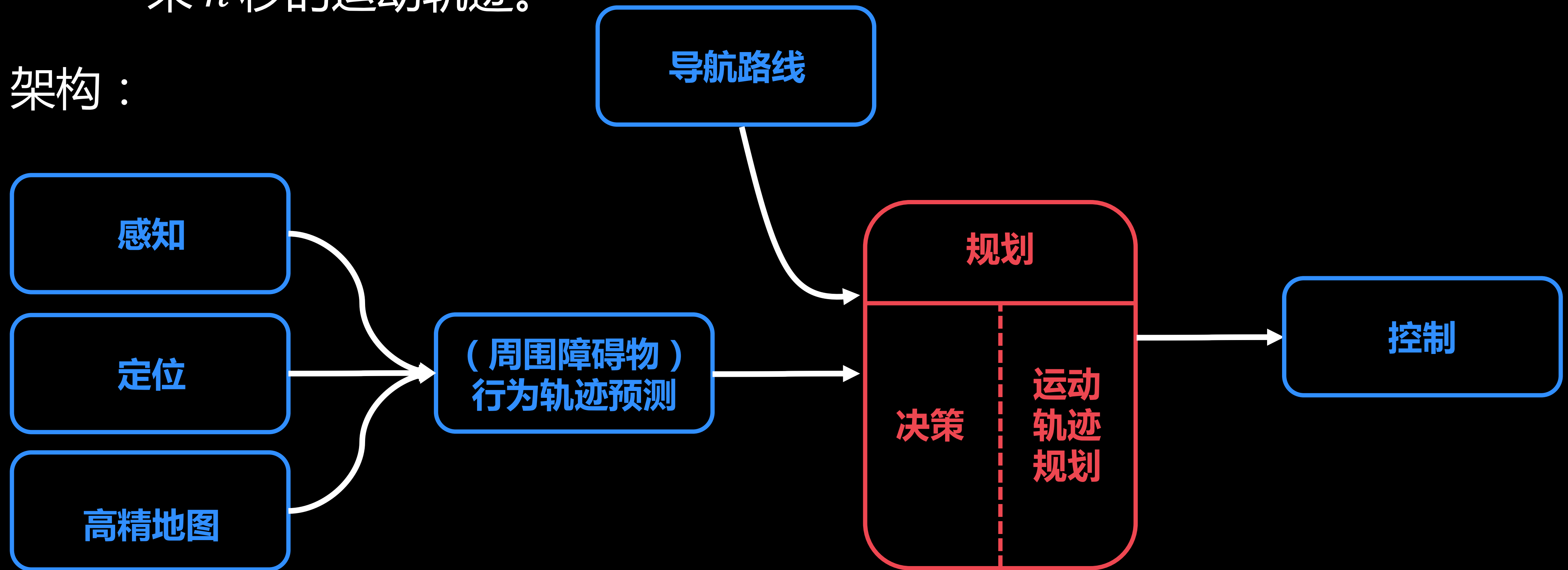
潘嘉诚

Apollo软件工程师

规划模块综述

- 定义：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。

- 架构：



- 特点：接收离散的信息输入，规划出连续的运动轨迹并输出给控制模块执行。

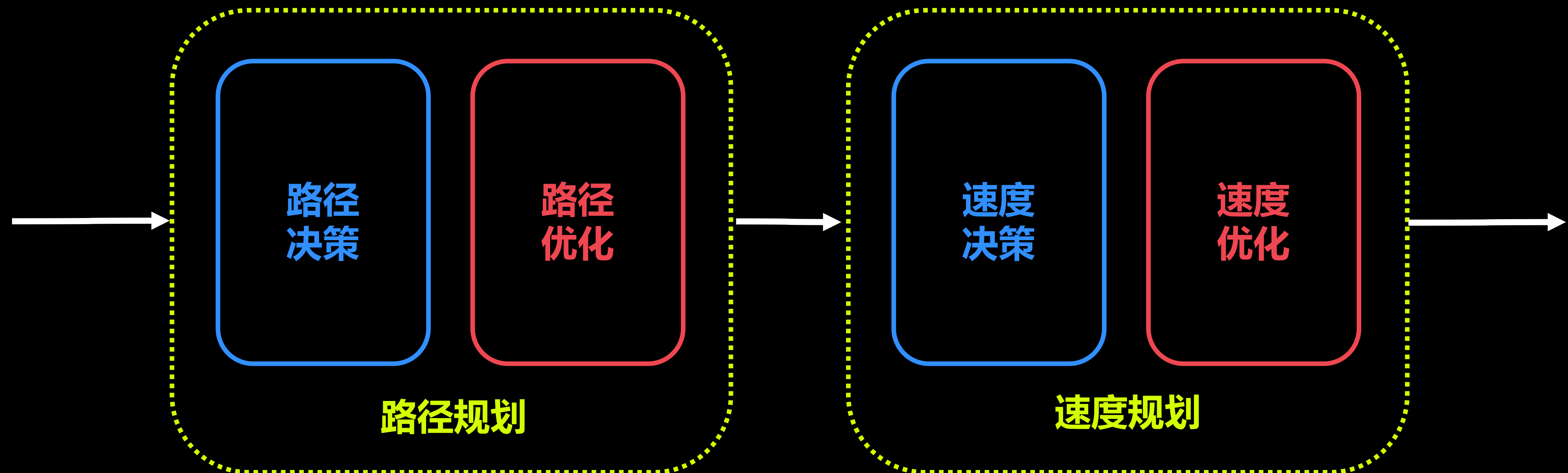
规划模块的目标

- 安全：避免所有的碰撞和任何可能的险情；
- 高效：在合理的时间范围内抵达终点/目的地；
- 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



□ 路径规划

□ 速度规划

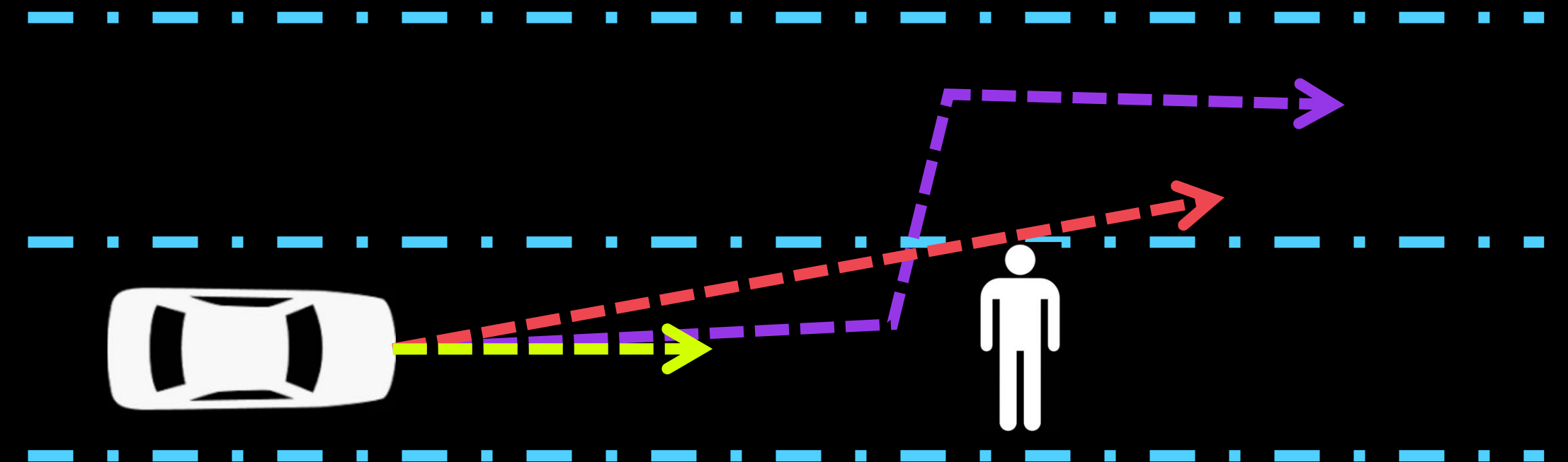
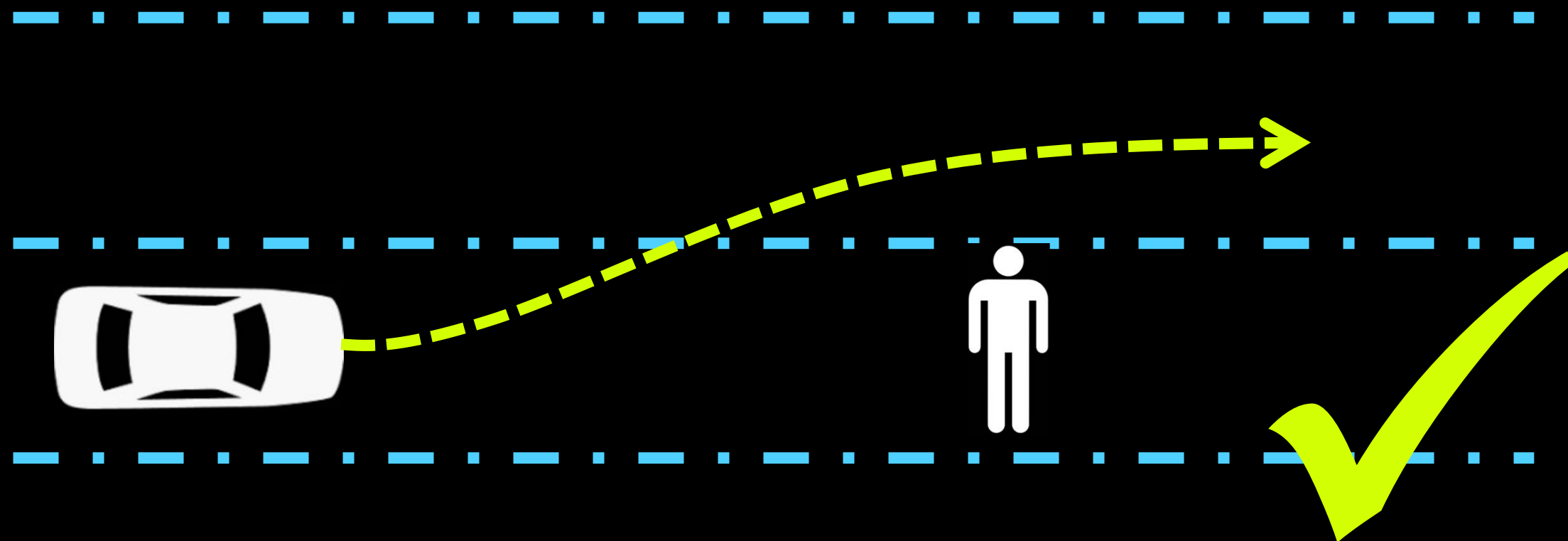
□ 实例分析

□ 运动轨迹规划的挑战

路径规划

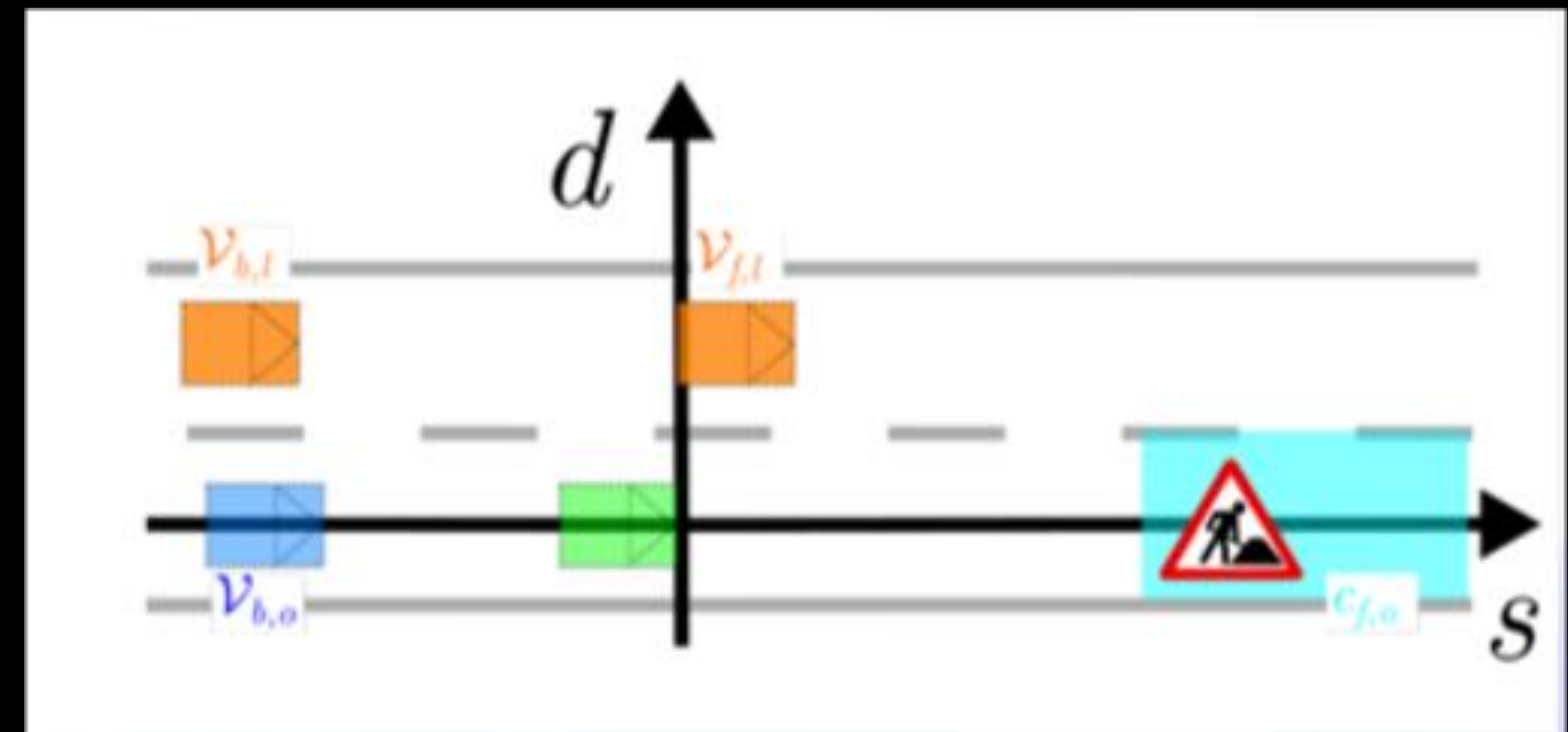
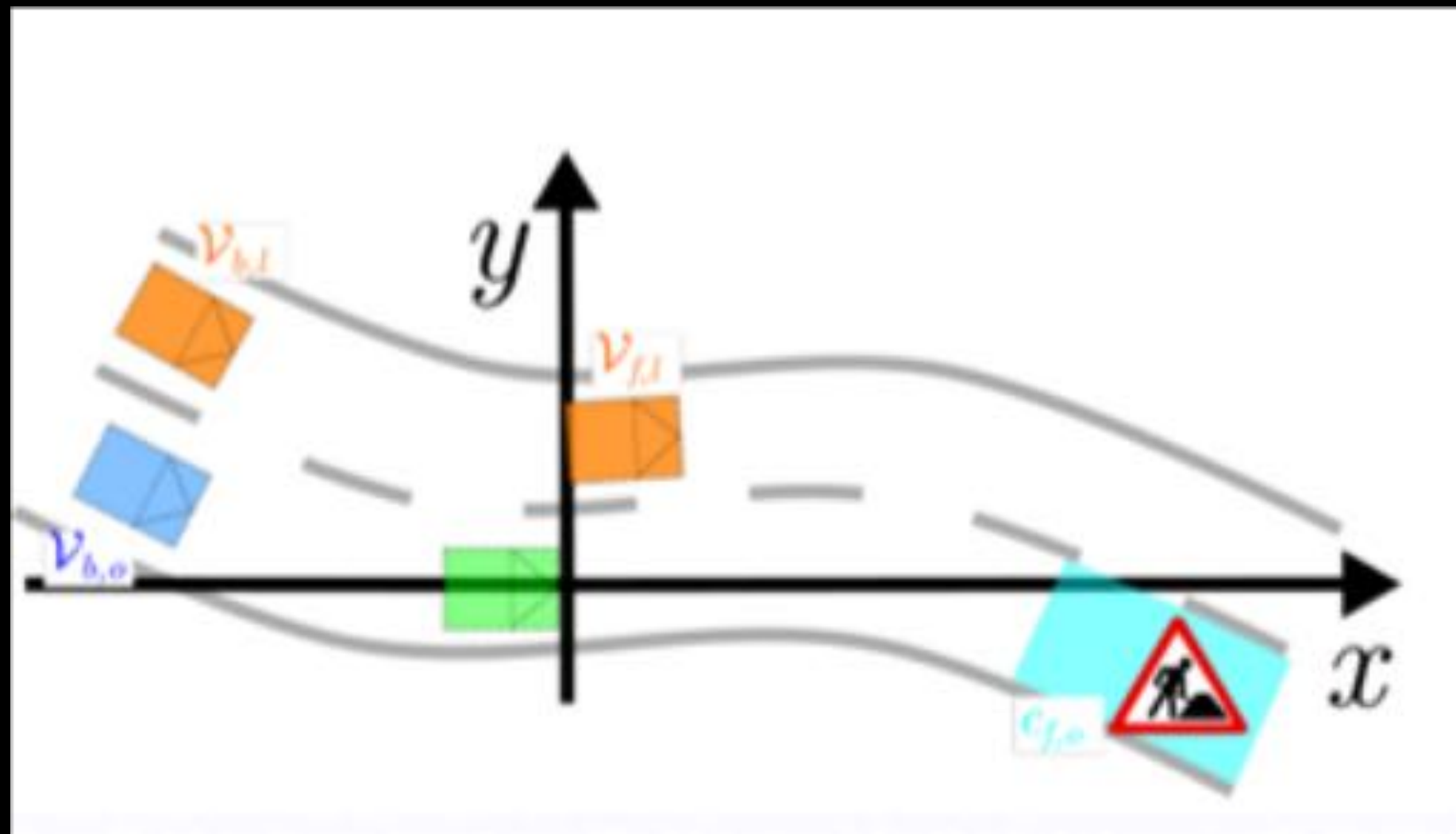
路径规划的目标

- 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。



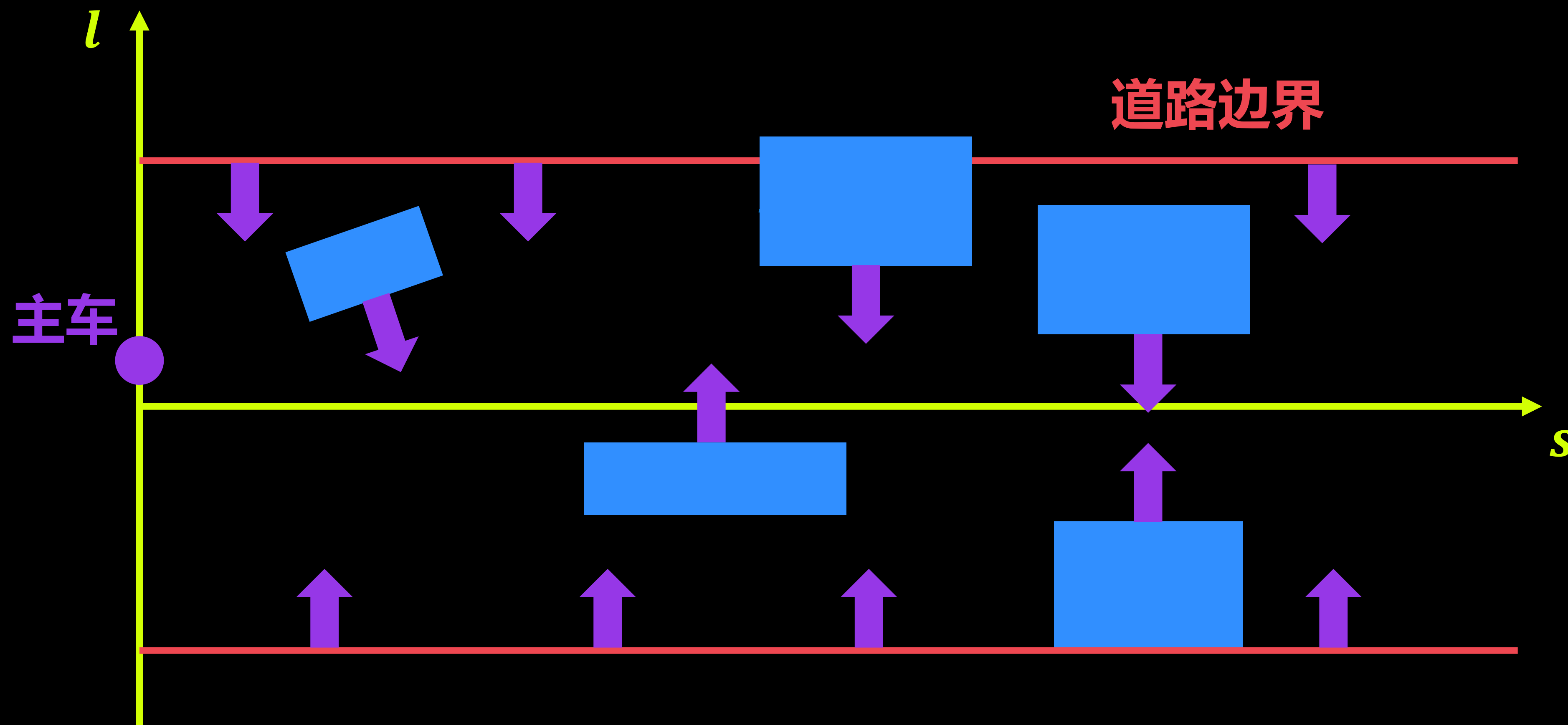
为什么用弗莱纳 (Frenet) 坐标系？

- 复杂问题的难度降维
- 不受道路几何形状影响的更好的场景理解



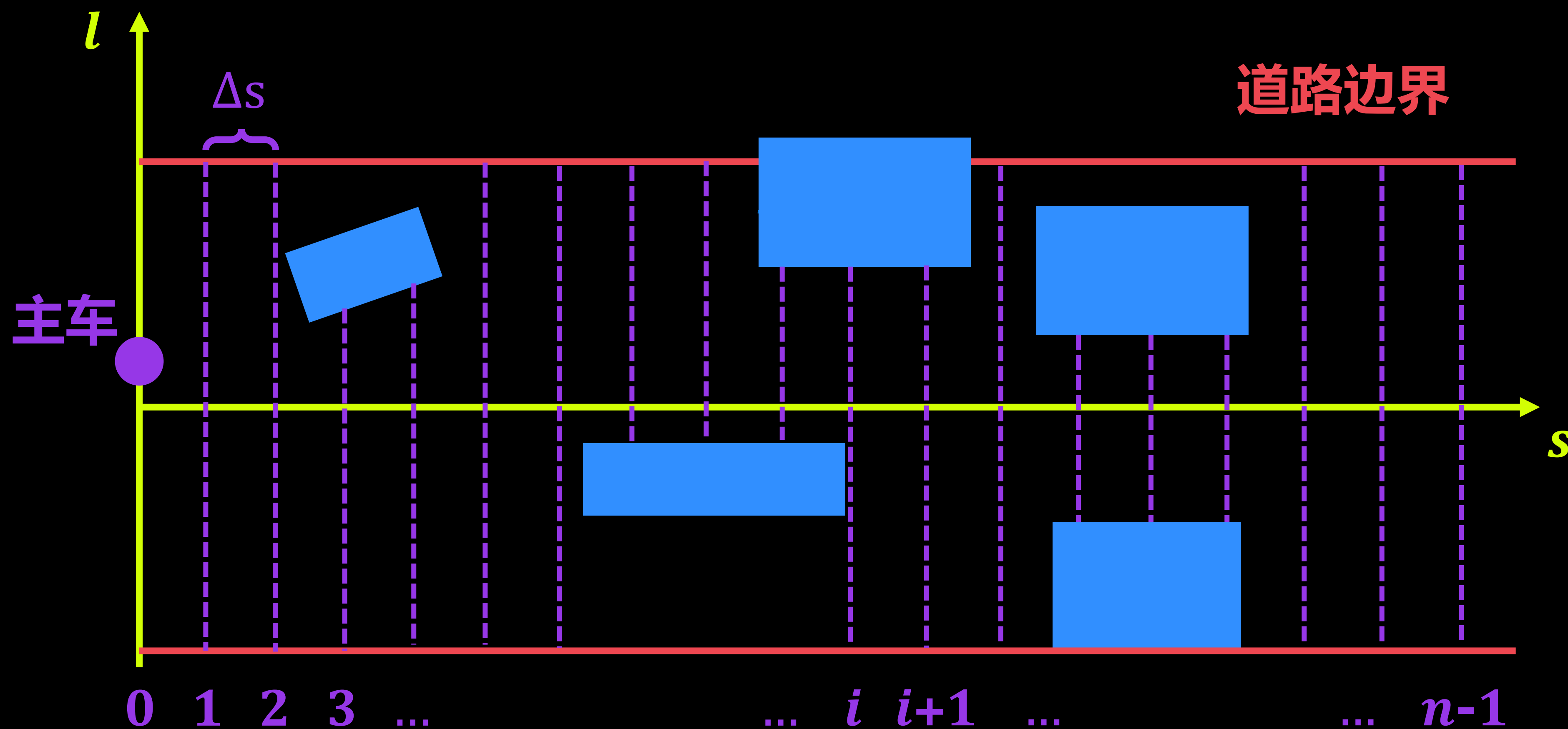
路径决策

- 根据道路边界、交规、障碍物特征等作出大致的决策：



路径优化

1. 以 Δs 为间隔采样，得到 n 个点：



路径优化

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：

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

- 必须满足基本的物理原理：

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

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

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

路径优化

3. 明确要努力达到的目标：

- 确保安全、礼貌的驾驶，尽可能贴近车道中心线行驶：

$$|l_i| \downarrow$$

- 确保舒适的体感，尽可能降低横向速度/加速度/加加速度：

$$|l'_i| \downarrow, \quad |l''_i| \downarrow, \quad |l'''_{i \rightarrow i+1}| \downarrow$$

路径优化

4. 转化为二次规划问题，求解：

$$\min f = w_l \sum_{i=0}^{n-1} l_i^2 + w_{l'} \sum_{i=0}^{n-1} l_i'^2 + w_{l''} \sum_{i=0}^{n-1} l_i''^2 + w_{l'''} \sum_{i=0}^{n-2} l_{i \rightarrow i+1}'''^2$$

$$\text{s. t. } \forall i \quad l_i \in (l_{min}^i, l_{max}^i)$$

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

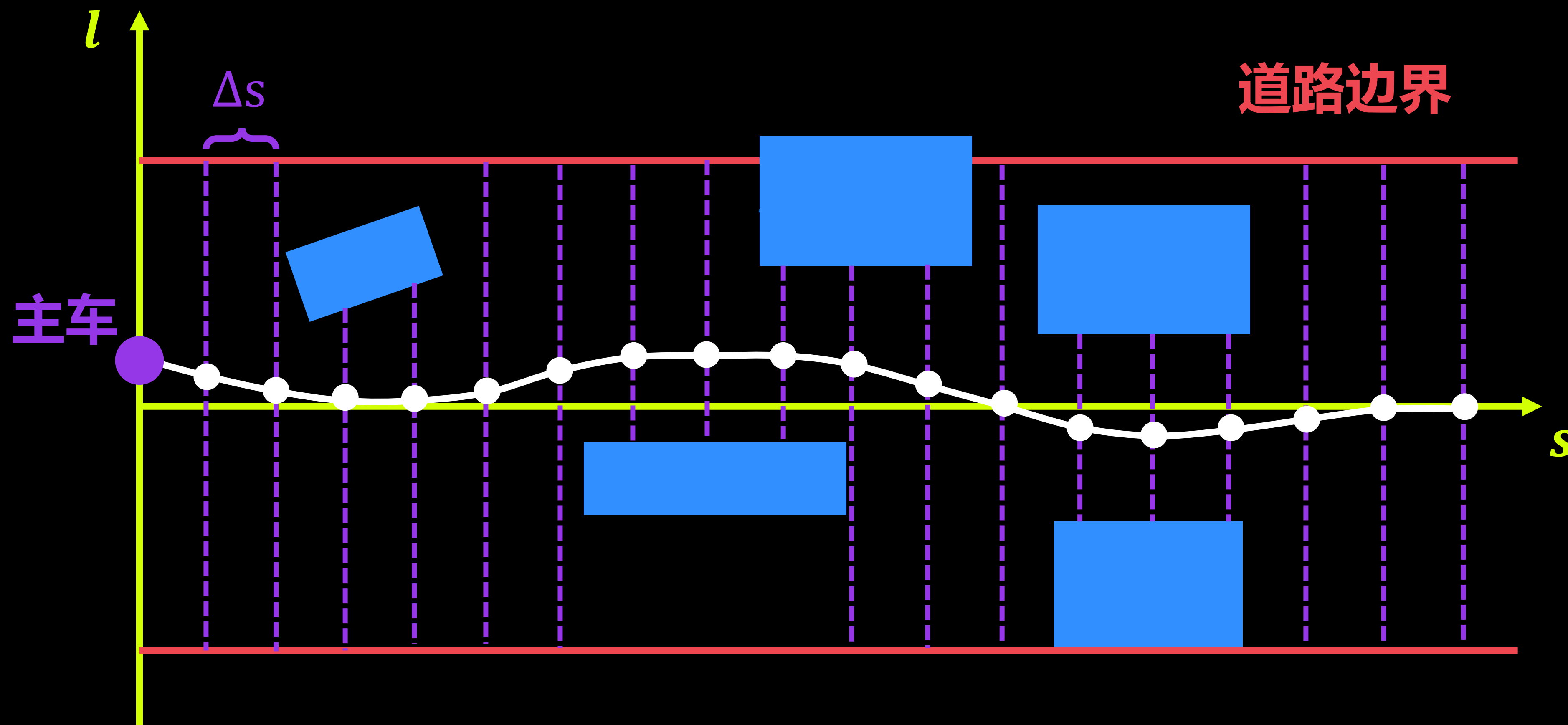
$$l_{i+1} = l_i + l_i' \times \Delta s + \frac{1}{2} l_i'' \times \Delta s^2 + \frac{1}{6} l_{i \rightarrow i+1}''' \times \Delta s^3$$

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

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

路径优化的输出

- 平滑、舒适、能合理避开障碍物并且尽快到达目的地的路径。



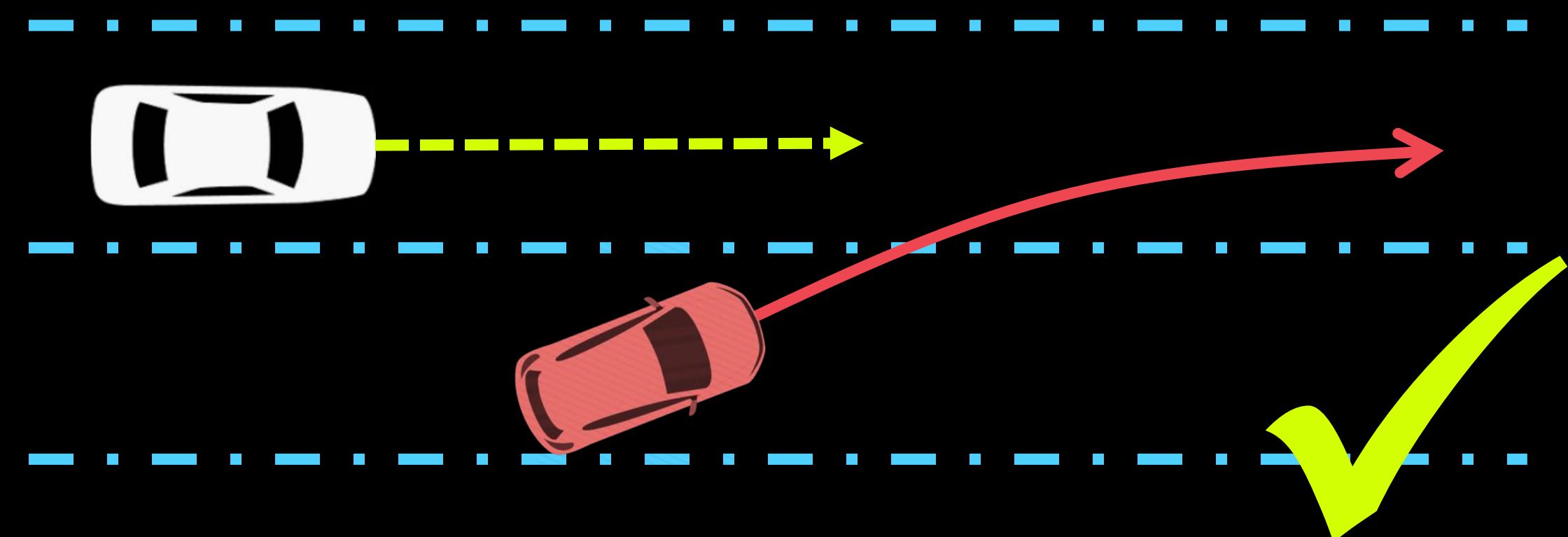
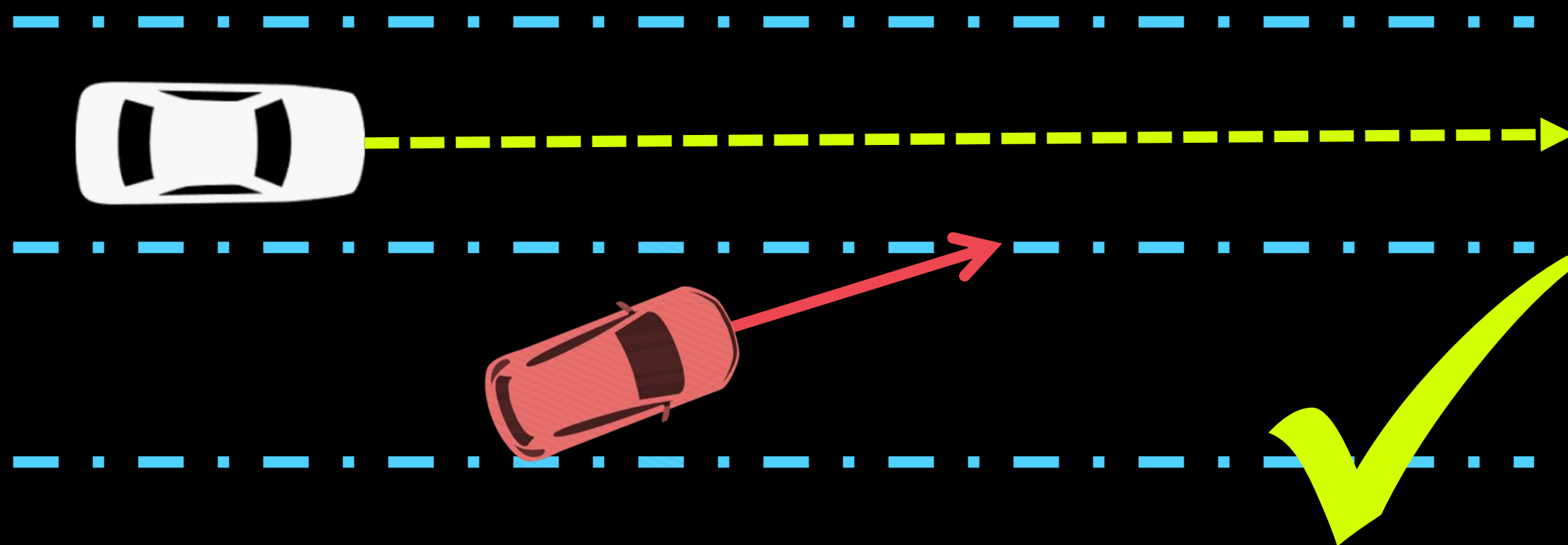
速度规划

速度规划的目标

- 安全：避让复杂、高速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，保证合理的速度分配。

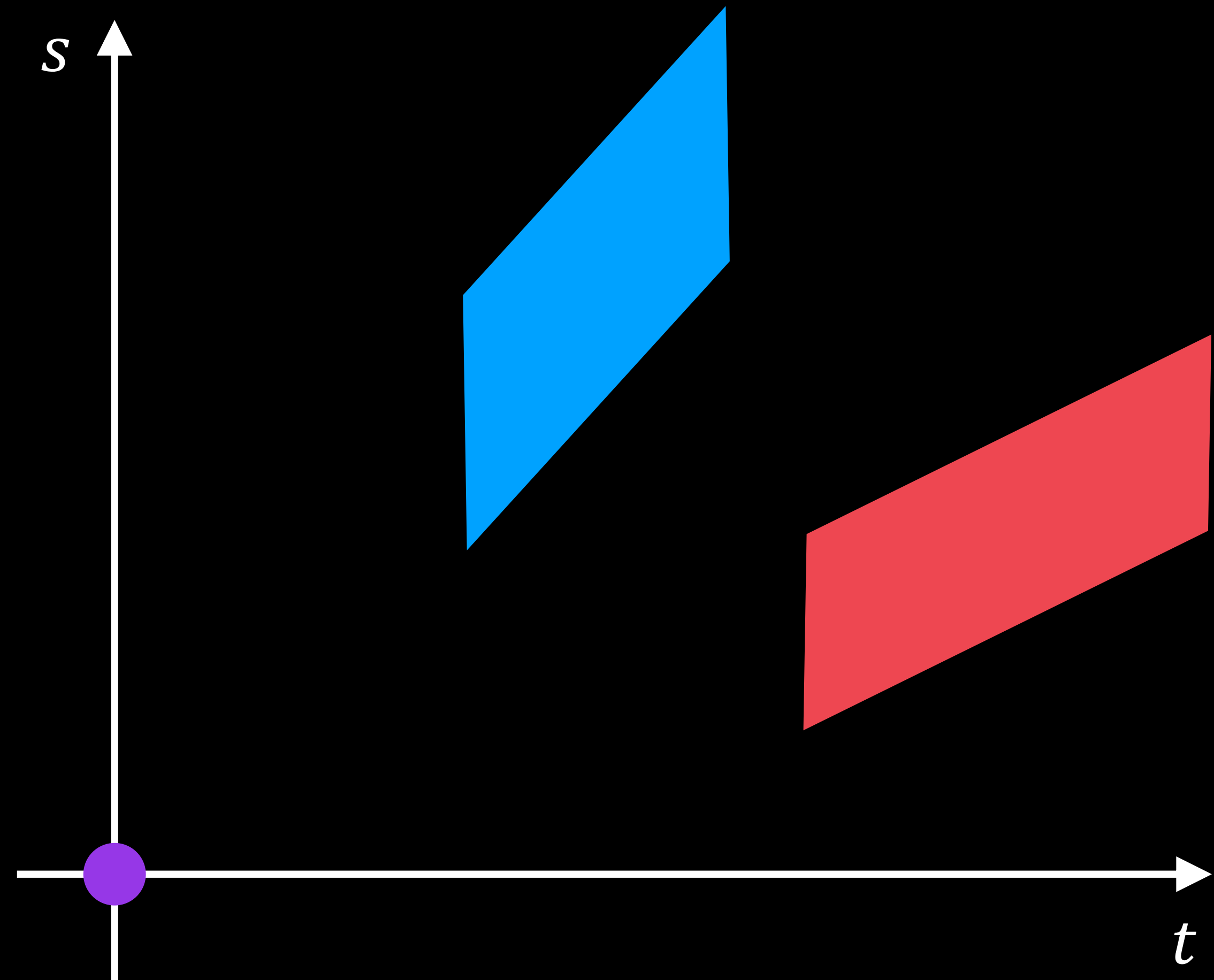
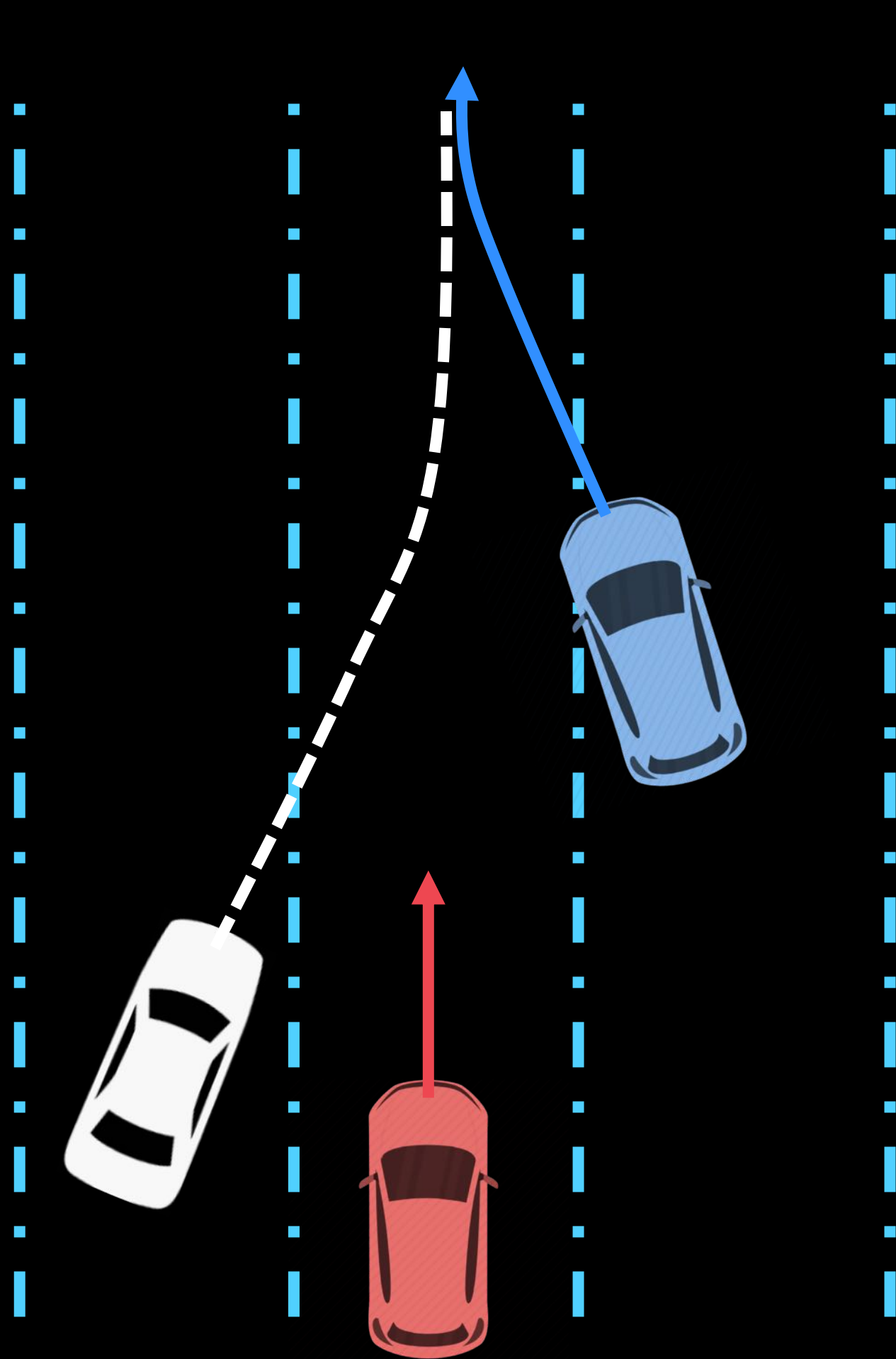
速度规划的目标

- 安全：避让复杂、高速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，保证合理的速度分配。



建立参考系 —— 路程-时间 ($s-t$) 坐标系

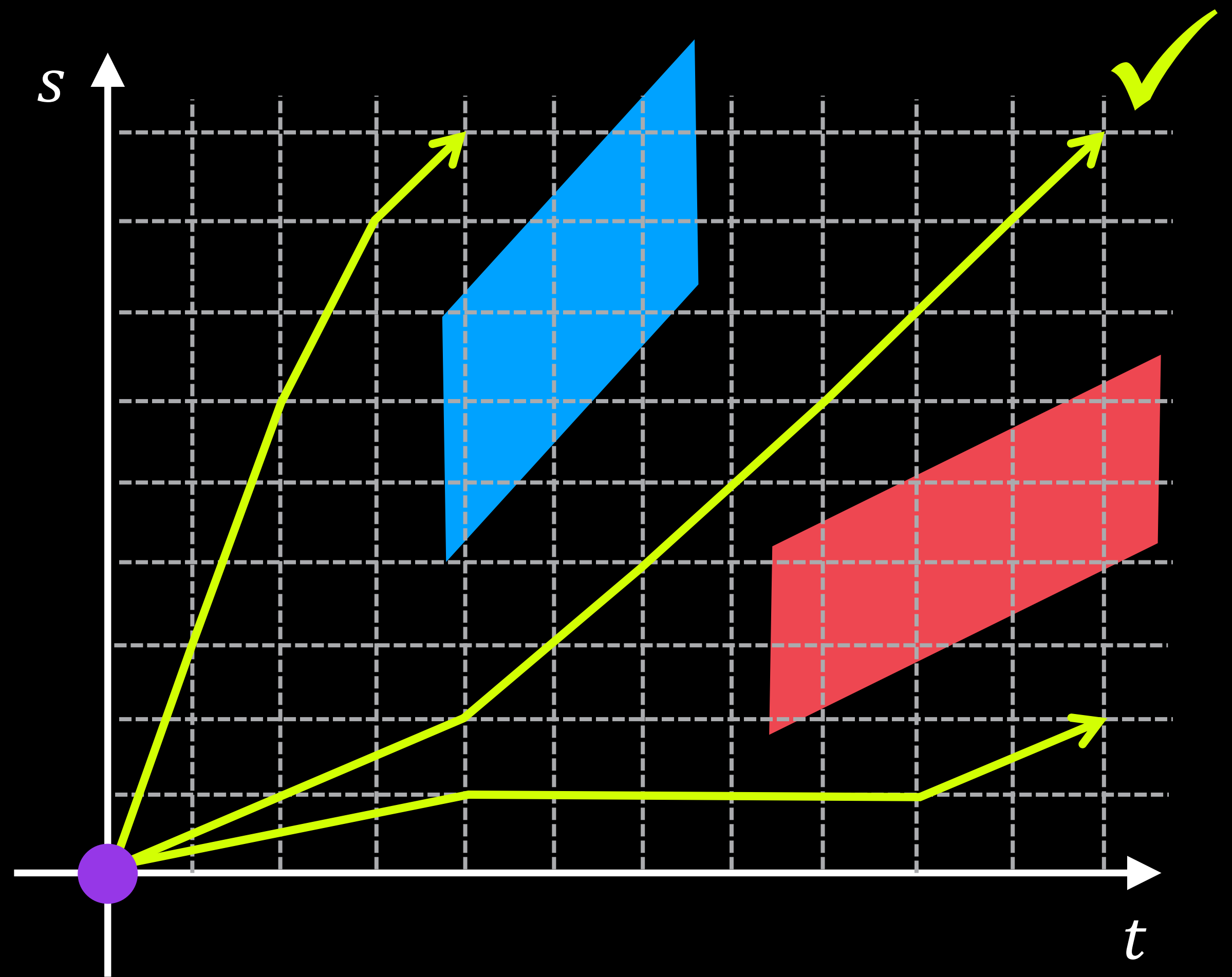
- 将复杂问题降至二维



速度决策

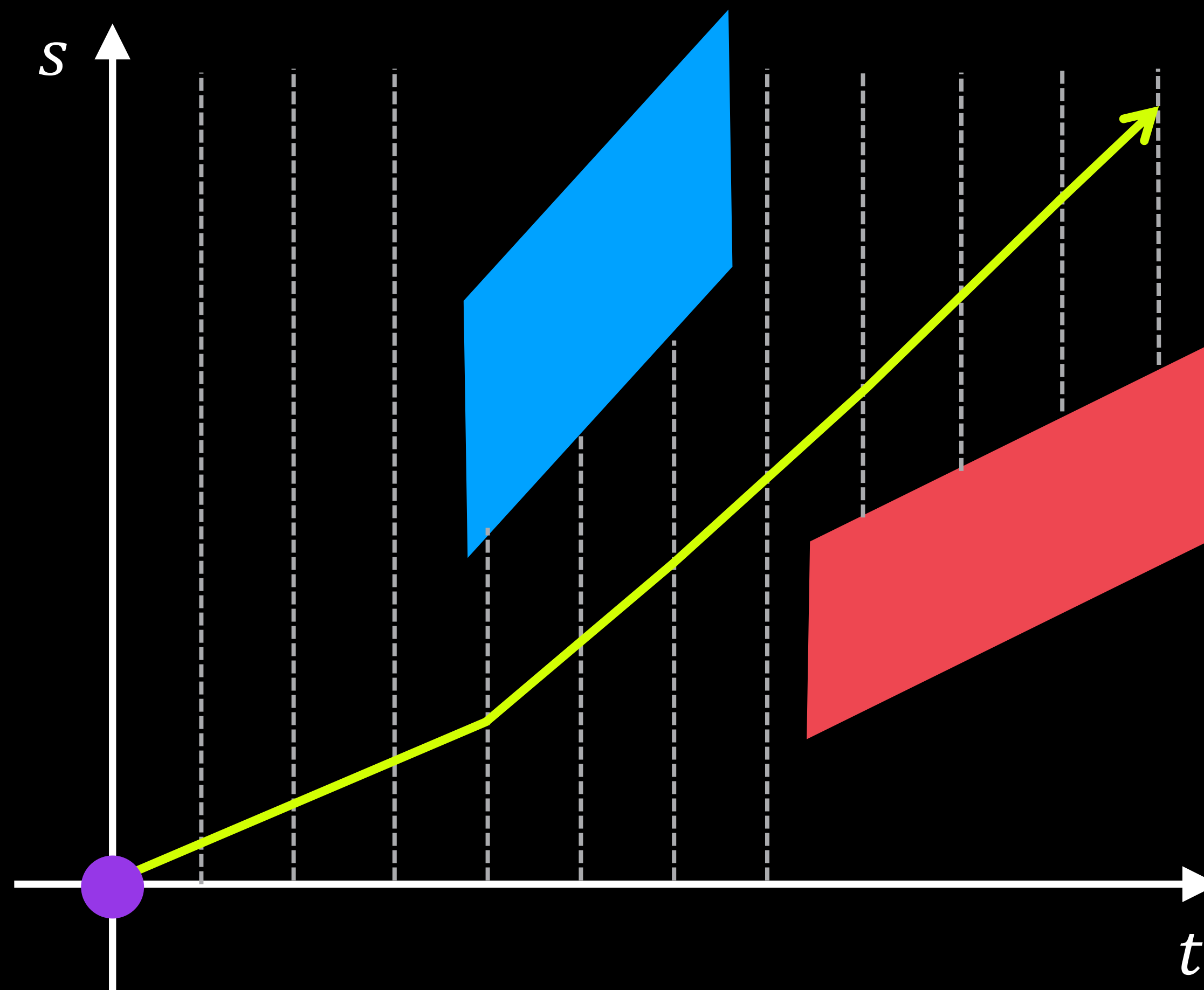
- 对路程和时间进行采样
- 搜索出粗略的可行路线
- 选出代价最小的一条

代价函数需考虑到限速、碰撞、路径形状，舒适度，完成时间等。



速度优化

1. 以 Δt 为间隔采样



速度优化

2. 明确要满足的约束条件

- 主车不能和障碍物有碰撞：

$$s_i \in (s_{min}^i, s_{max}^i)$$

- 根据当前状态，主车的加速度/加加速度有特定运动学限制：

$$\ddot{s}_i \in [\ddot{s}_{min}, \ddot{s}_{max}], \quad \ddot{s}_{i \rightarrow i+1} \in [\ddot{s}_{min}, \ddot{s}_{max}]$$

- 必须满足基本的物理原理：

$$s_{i+1} = s_i + \dot{s}_i \times \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{s}_i \times \Delta t^2 + \frac{1}{6} \ddot{s}_{i \rightarrow i+1} \times \Delta t^3$$

$$\dot{s}_{i+1} = \dot{s}_i + \ddot{s}_i \times \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{s}_{i \rightarrow i+1} \times \Delta t^2$$

$$\ddot{s}_{i+1} = \ddot{s}_i + \ddot{s}_{i \rightarrow i+1} \times \Delta t$$

速度优化

3. 明确要努力达到的目标：

- 尽可能贴合决策时制定的速度分配：

$$|s_i - s_i^d| \downarrow$$

- 确保舒适的体感，尽可能降低加速度/加加速度：

$$|\ddot{s}_{i+1}| \downarrow, \quad |\ddot{s}_{i \rightarrow i+1}| \downarrow$$

速度优化

4. 转化为二次规划问题，求解：

$$\min f = w_h \sum_{i=0}^{n-1} (s_i - s_i^d)^2 + w_{\ddot{s}} \sum_{i=0}^{n-1} \ddot{s}_i^2 + w_{\ddot{s}} \sum_{i=0}^{n-2} \ddot{s}_{i \rightarrow i+1}^2$$

s. t. $\forall i$

$$s_i \in (s_{min}^i, s_{max}^i)$$

$$\ddot{s}_i \in [\ddot{s}_{min}, \ddot{s}_{max}], \quad \ddot{s}_{i \rightarrow i+1} \in [\ddot{s}_{min}, \ddot{s}_{max}]$$

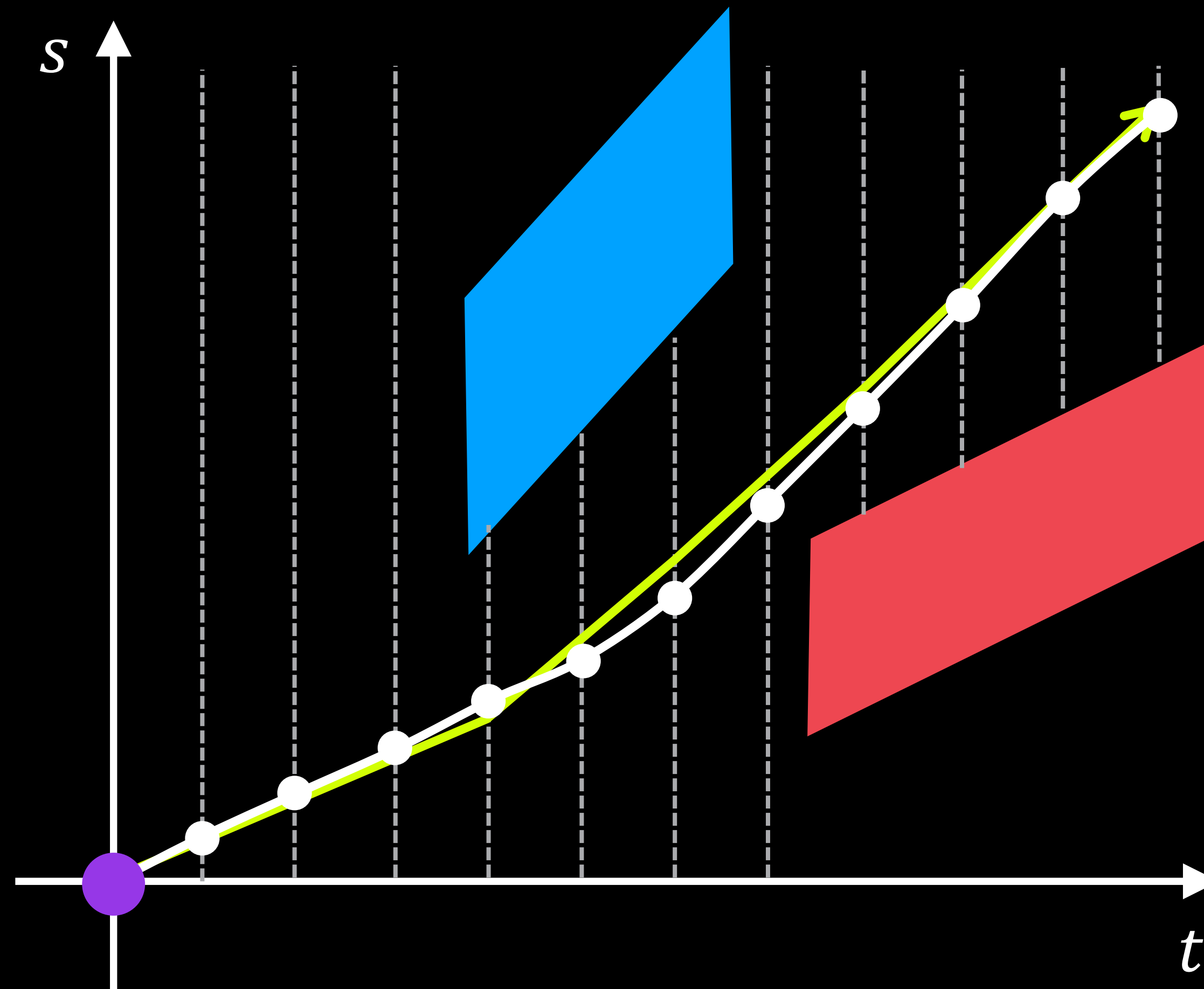
$$s_{i+1} = s_i + \dot{s}_i \times \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{s}_i \times \Delta t^2 + \frac{1}{6} \ddot{s}_{i \rightarrow i+1} \times \Delta t^3$$

$$\dot{s}_{i+1} = \dot{s}_i + \ddot{s}_i \times \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{s}_{i \rightarrow i+1} \times \Delta t^2$$

$$\ddot{s}_{i+1} = \ddot{s}_i + \ddot{s}_{i \rightarrow i+1} \times \Delta t$$

速度优化的输出

- 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。



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。

谢谢

