

智能驾驶系列报告（二）：特斯拉智能驾驶方案简剖

分析师：李蕙 S0910519100001

联系人：戴箬箬

- ◆ 不同于绝大多数国内车企在自动驾驶上采取多传感器融合方案，特斯拉FSD在发展初期就摒弃激光雷达、且不配备高清地图，成为在感知层以摄像头为核心的纯视觉解决方案代表；其依靠车身搭载的摄像头来捕捉周围的环境信息，并经过算法及神经网络模型处理，最终输出3D场景下的信息用于智能驾驶。
- ◆ FSD智能驾驶的实现基于特斯拉独树一帜的软件算法，创新性的提出BEV+Transformer+Occupancy Network的感知范式，并成为全球首家“端到端”神经网络量产上车的企业，实现了从繁琐规则驱动到数据驱动的简化，小鹏、蔚来等多家国内车企纷纷追随；硬件端方面，特斯拉持续增加摄像头数量，对其他传感器则倾向于做“减法”，以更好地适配其纯视觉技术路线。
- ◆ 得益于数据量、算力投入、硬件适配度等方面的明显占优，特斯拉在依赖算力的纯视觉解决方案上遥遥领先国内厂商，FSD智驾拟人化程度高、安全性及可靠性更为凸显、且能有效节省运算空间及成本；但同时，FSD作为纯视觉方案在恶劣天气等场景下的性能较弱，其买断价也较国内市面上其他高阶辅助驾驶软件更高，或系特斯拉需改进的方面。
- ◆ 中国作为全球新能源汽车最大的市场，是各车企发展智驾的最优之选；然而，缺乏冗余设计或引发的驾驶安全问题、以及缺少测绘资质或带来的数据安全问题，均成为阻碍特斯拉入华的重要因素。硬件设计方面，特斯拉在HW4.0中重新加入高精度4D毫米波雷达，纯视觉方案的驾驶安全性问题或有望改善；数据安全方面，特斯拉则借力百度获得车道级导航地图，并拟在中国建立数据中心。截止2023年年底，特斯拉在中国市场的累计销量超过170万辆；假设FSD在现役中国特斯拉汽车中渗透率为5%-36%，预计新增收入54.4亿元-391.68亿元。
- ◆ **风险提示：**智驾行业发展不达预期、核心零部件价格波动、技术迭代及产品研发滞后、上市公司业绩不达预期、政策风险、数据信息统计及模型测算偏差风险、过去经验不代表未来、系统性风险等。

- 01 特斯拉FSD的发展历程——化繁为简
- 02 解析特斯拉FSD
- 03 特斯拉FSD进入中国市场的进度
- 04 特斯拉FSD产业链概况及相关标的
- 05 风险提示



特斯拉FSD的发展历程——化繁为简

1.1 特斯拉FSD自动驾驶方案

1.1.1 FSD是特斯拉辅助驾驶方案中功能最完整的产品

1.1.2 特斯拉作为纯视觉方案引领者，摄像头是FSD智驾的核心

1.2 算法端迭代：全球首个“端到端”神经网络量产上车，实现对繁琐规则编写的替代

1.3 硬件端迭代：高度依赖摄像头，对其他传感器则倾向于做“减法”

1.1.1 FSD是特斯拉辅助驾驶方案中功能最完整的产品

- ◆ 特斯拉的自动驾驶方案包括基础版自动辅助驾驶（AP）、增强版自动辅助驾驶（EAP）、以及完全自动驾驶（FSD）；其中，FSD全称 Full Self-Driving（完全自动驾驶），是特斯拉辅助驾驶Autopilot产品组合中功能最完整的产品。
- ◆ 功能上来看，特斯拉FSD除基础的主动巡航及车道维持居中外，还可以实现：1) 自动辅助导航驾驶，包括自动驶入和驶出高速公路匝道或立交桥岔路口，超过行驶缓慢的车辆；2) 自动辅助变道，包括高速公路上自动辅助变换车道；3) 自动泊车，包括平行泊车与垂直泊车；4) 智能召唤则是在合适的场景下，停在车位的车辆会响应召唤、驶出车位并前往车主所在位置；5) 交通灯、标志识别；6) 市区自动辅助转向，检测车道、车辆和障碍物，并操作车辆进行转向；7) 自动速度偏移调整，可根据不同的环境和场景，自主调整车辆的行驶速度。

图：特斯拉各类自动驾驶方案的不同功能

自驾功能	AP (基础版自动 辅助驾驶)	EAP (增强版自动 辅助驾驶)	FSD (完全自动 驾驶)
主动巡航/跟车	☺	☺	☺
车道维持/居中	☺	☺	☺
自动辅助导航驾驶		☺	☺
自动变换车道		☺	☺
自动泊车		☺	☺
召唤/智慧召唤		☺	☺
交通识别/标志识别			☺
市区自动辅助转向			☺
自动速度偏移调整			☺

图：特斯拉FSD智驾包可实现的功能

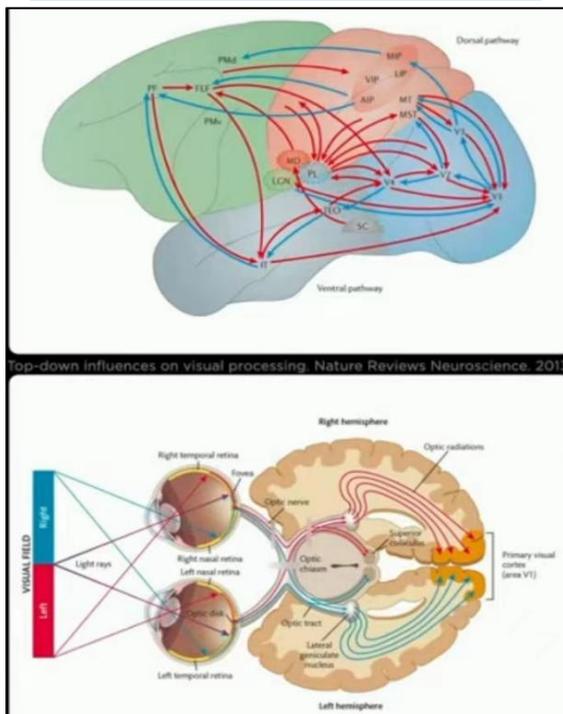


1.1.2 特斯拉作为纯视觉方案引领者，摄像头是FSD智驾的核心

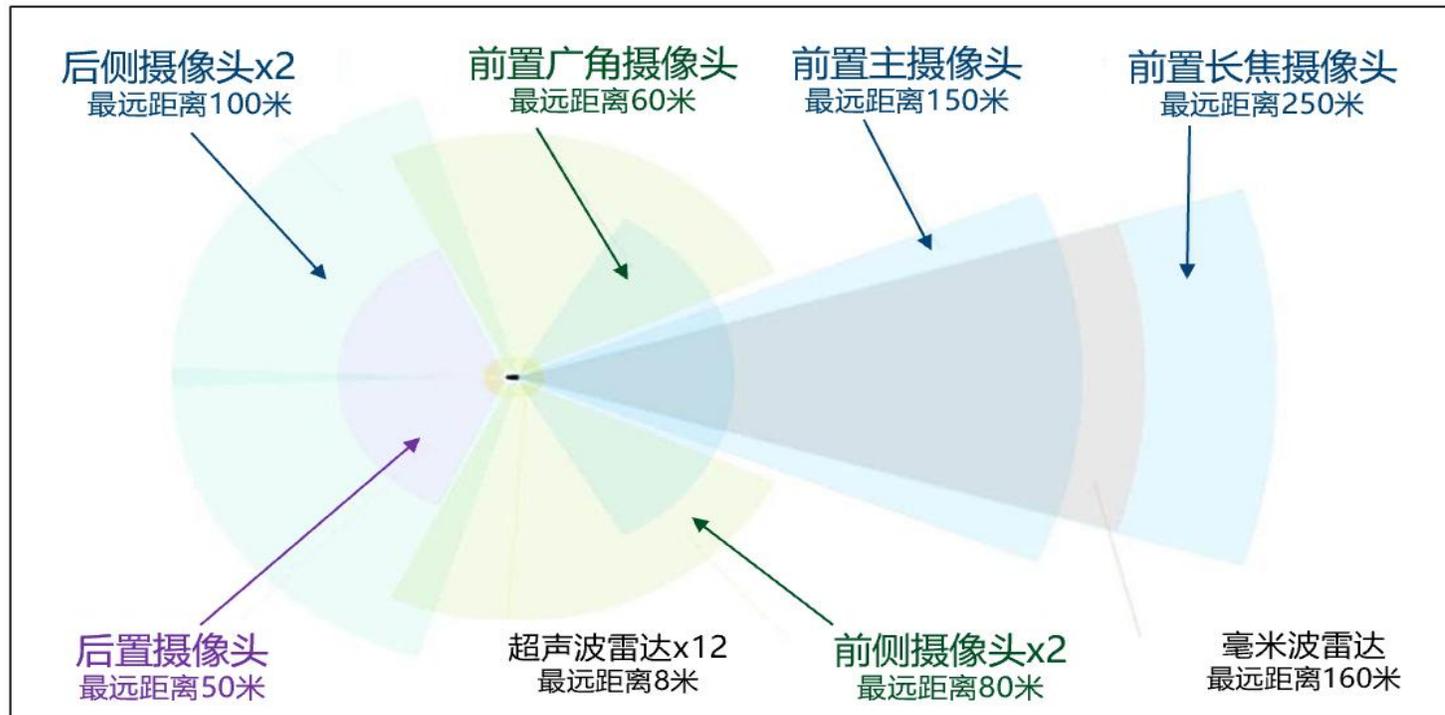
不同于大部分国内厂商多传感器融合方案，特斯拉FSD自动驾驶是以摄像头为核心的纯视觉解决方案。

- ◆ 纯视觉方案的最初设计灵感来自对人类视觉的研究；即人眼睛搜集的信息到达视网膜后，经过大脑皮层的多个区域、神经层，最终形成生物视觉，并在脑中生成图像。特斯拉的目标就是通过算法、软件及硬件来设计汽车的视觉皮层，建立像人脑一样的、基于视觉的计算机神经网络系统。
- ◆ 首先，在特斯拉汽车行驶过程中，车辆通过摄像头收集环境图像信息；特斯拉HW2.0/2.5/3.0版本硬件都配备了8颗监测不同方位的摄像头，分别为三颗前置摄像头（其中1颗主摄像头、1颗广角摄像头、1颗窄视长焦摄像头）、2颗前侧摄像头、2颗后侧摄像头、以及1颗后置摄像头。

图：人类的视觉神经网络系统



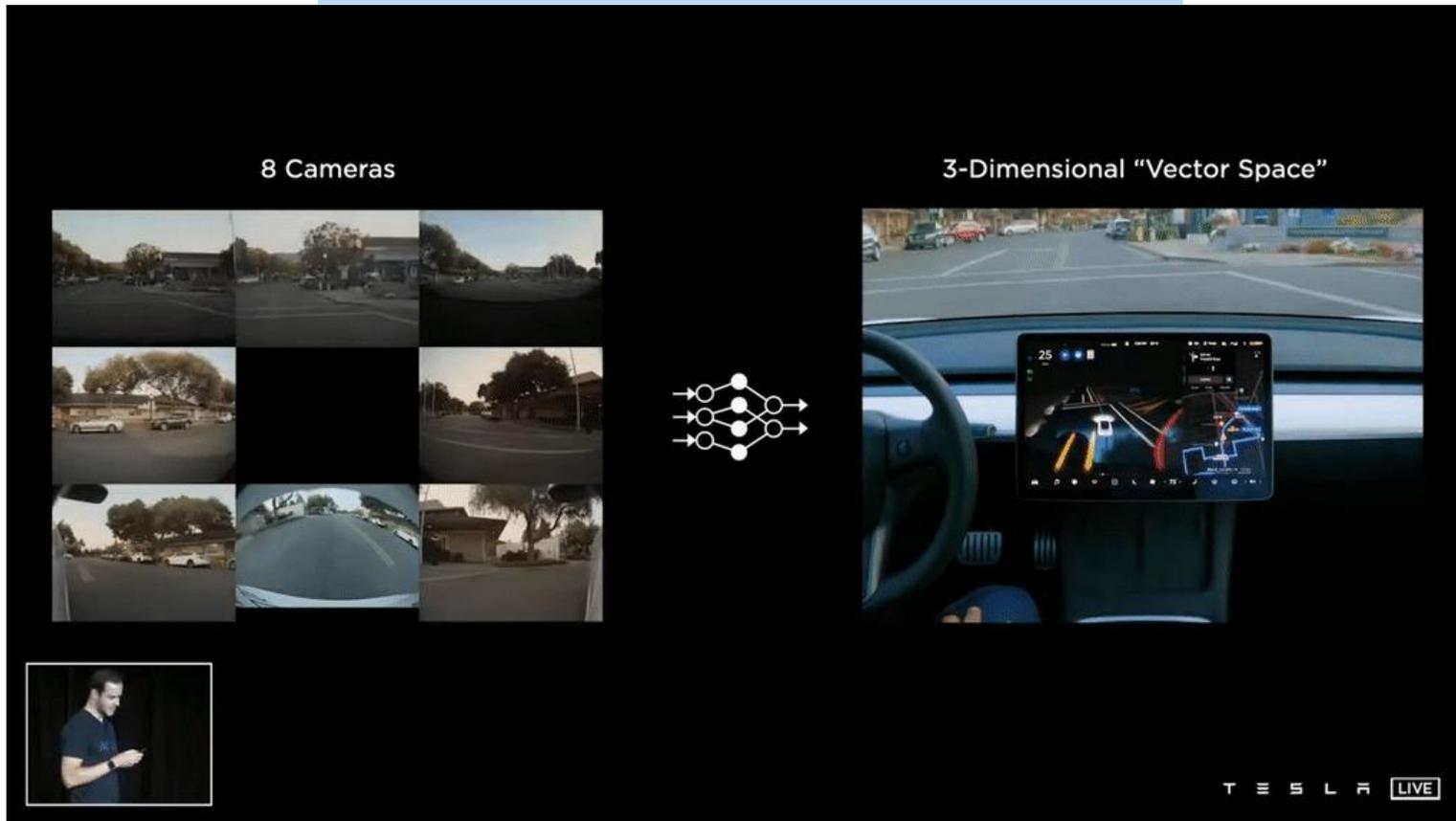
图：特斯拉FSD HW2.0/2.5/3.0装配的8颗摄像头



1.1.2 特斯拉作为纯视觉方案引领者，摄像头是FSD智驾的核心

- 可以看到，车辆周围的8个摄像头通过神经网络生成三维向量空间；向量空间中包含了自动驾驶所需要的信息，如线条、边缘、路缘、交通标志、红绿灯、以及汽车的位置、方向、深度、速度。流程来看，由“眼睛（摄像头）”获得的上述信息将在神经网络“大脑（处理器）”中进行处理判断，然后给“腿脚（行驶车辆）”下达动作指令。

图：特斯拉FSD HW2.0/2.5/3.0装配的8颗摄像头



FSD特征：

FSD的设计哲学在于打造一个闭环的、端到端的决策系统，意味着车辆不仅要具备感知环境的能力，还要能理解环境信息并做出驾驶决策，且所有行为**都由车辆自身完成**，无需依赖外部基础设施的辅助。

首先，驾驶辅助系统通过学习各种路况视频，得出一个参数调优后的神经网络；**优化后的神经网络被部署到以HW3.0为例的硬件上**，根据车辆摄像头获得的图像进行推理，得出车辆控制决策。

但同时，若车辆遇到各类“边角案例”或驾驶员操作与系统“预想”操作不一致时，车辆都会脱敏匿名将实际情况上传给特斯拉云端服务器，**通过庞大的集中算力进行深度学习以优化系统**；马斯克曾表示“一辆汽车学会一件事后，所有车辆就都学会了。”

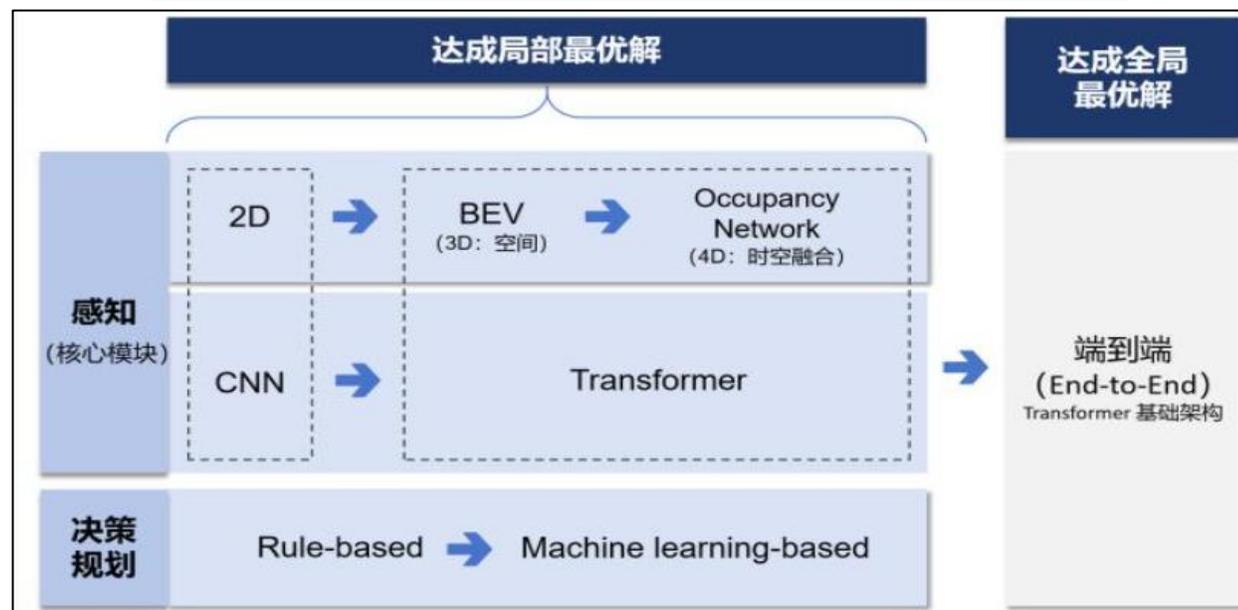
1.2 算法端迭代

- ◆ 自动驾驶的算法模块通常分为“感知”、“决策规划”、“运动控制”。其中，“感知”模块是自动驾驶的核心，大部分的技术升级都集中在感知模块，其目的是让车辆对驾驶环境的“感知”达到人类感知的级别；而“决策规划”则是基于“感知”模块输出的结果，通过规划汽车行为和行车路径，使得汽车达到指定目的地，且尽可能确保行车安全性、效率性和舒适性。
- ◆ 感知层面，特斯拉经历了由“特征提取网络RegNet”向“BEV+Transformer”、再向“BEV+Transformer+Occupancy Network”转变，决策规划层面则自2021年由“Rule-based”向“Machine learning-based”逐步倾斜；直至2024年1月，特斯拉通过推出FSD V12 Beta，成为全球首个“端到端”神经网络量产上车的企业，实现了感知、决策、规划相融合。

图：自动驾驶的算法框架



图：特斯拉FSD从“局部最优解”到“全局最优解”的演变



1.2.1 算法1.0: 2016年开启自研算法, 采用人工标注+特征提取网络进行物体识别

(1) 2016-2018年: 特斯拉采用常规的骨干网结构, 并对数据采取人工标注。

- ◆ 2014年特斯拉发布的第一代硬件Hardware 1.0, 软硬件均由Mobileye提供; 然而在2016年特斯拉发生的“全球首宗自动驾驶致命事故”, 导致双方合作结束。
- ◆ 2016年特斯拉开启自研算法阶段, 首先对数据采用人工标注, 并通过Facebook提出的特征提取网络RegNet进行物体识别。初始的数据都是需要人工来标注, 如将图像中的物体(人、车、马、狗等)形态、类别及对应坐标一并输入到神经网络中, 神经网络就对上述物体有了一定的认知。随后, 采用特征提取网络RegNet进行物体识别; 在该特征提取网络中, 最底部有着极高的分辨率和较低的通道数用于检查图像细节, 而在顶部有着极高的通道数和较低分辨率则用于理解场景上下文语义信息。比如分辨率最高的一层看到一辆车、但不太确定, 最后一层分辨率最低的就通过语义关联告诉第一层这极有可能是一辆车, 这样就完成了一次识别。

出现的问题:

在自动驾驶的场景中, 往往需要在一个神经网络中同时完成多项任务, 比如车道线检测, 人物检测与追踪等, 进而引发了该算法出现head不够用的情况。

图: 神经网络RegNet进行物体识别

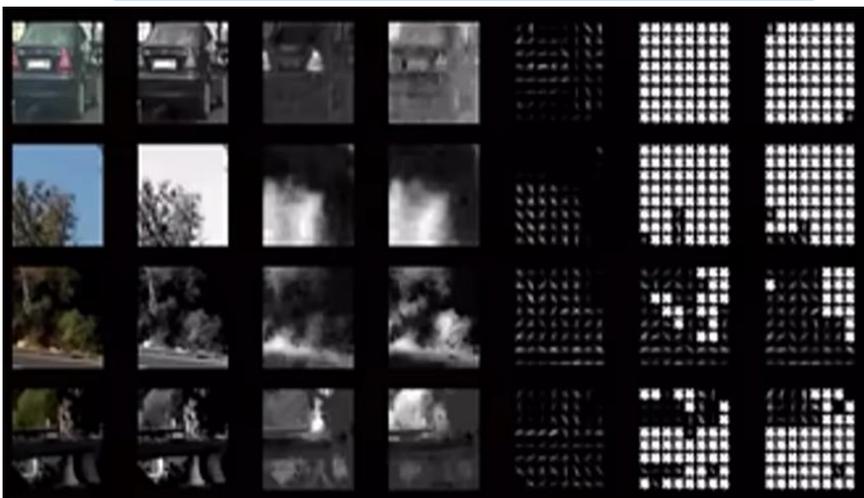


图: 对数据进行人工标注



1.2.2 算法2.0: 构建多任务学习神经网络架构, 减少任务间的相互干扰

(2) 2018-2019年: 构建多任务神经网络架构HydraNet (“九头蛇网络”)。

- ◆ 特斯拉构建了多任务学习神经网络架构HydraNet, 能够基于相同的视频输入, 分别进行若干任务(检测或判别); 将上述任务聚合在新的架构布局中, 使他们拥有共享的Backbone(骨干), 并将分支分成若干个Head(头部), 这种架构被称为HydraNets。HydraNet能够减少重复的卷积计算, 减少主干网络计算数量, 还能够将特定任务从主干中解耦出来, 进行单独微调, 比如车道识别、红绿灯识别等任务都有专门的Head来负责, 减少不同任务间的相互干扰。

出现的问题:

- 1) 自动驾驶依靠过去的「2D 图像+ CNN」实现全自动驾驶的可能性较低, 主要系摄像头采集的数据是 2D 图像, 但自动驾驶需要面对的却是三维真实世界。
- 2) 随着数据的逐步增加, 出现人工标注效率低、且沟通成本高等问题。

图:多任务学习神经网络架构HydraNet

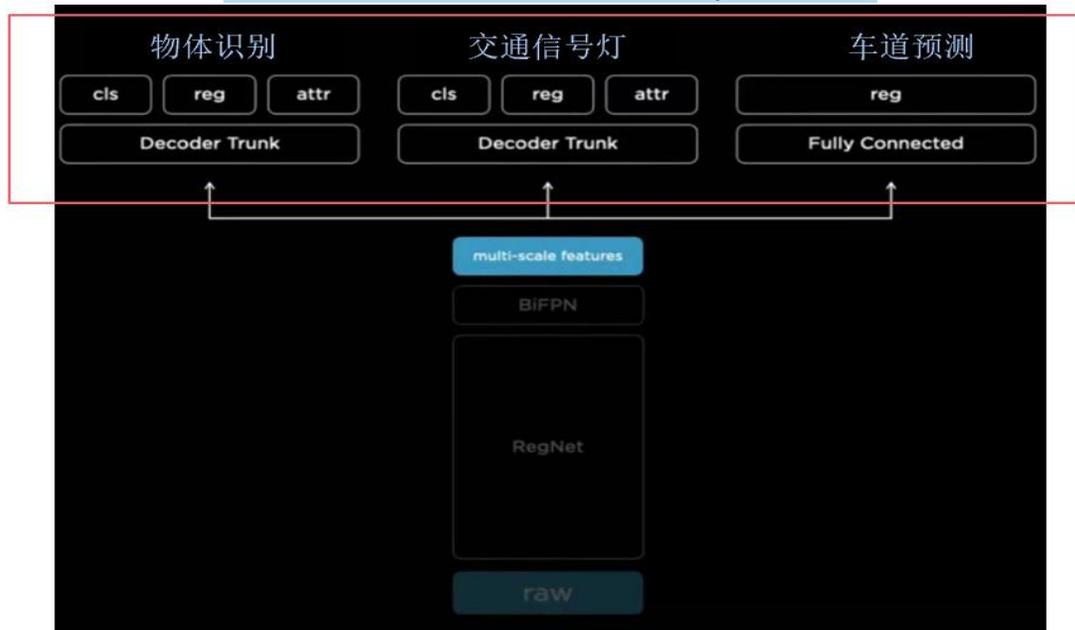


图: 行驶过程中, 不同任务采用不同颜色标注

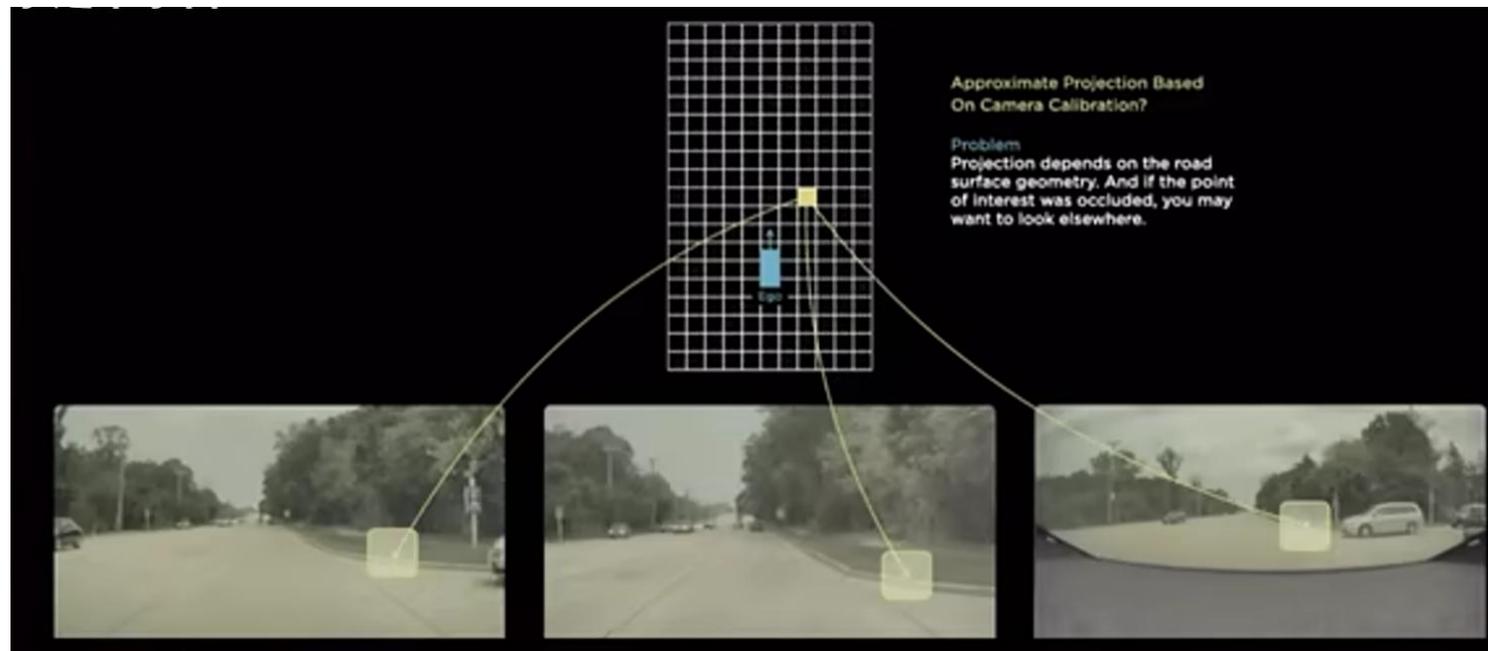


1.2.3 算法3.0：通过 BEV+Transformer架构进行2D升维，数据标注进入“半自动”阶段

(3) 2019-2020年：感知层引入BEV+Transformer架构实现图像升维，并使用自动标注系统；FSD首次发布并上车内测。

- ◆ 在特斯拉看来，2D 图像升维的最佳方式是BEV（鸟瞰图），目的是建立一个从空中俯瞰的平面图，来描绘车辆周围的事物以及他们的位置关系。那么需要做的是，将8个摄像头拍摄的画面物体投射到2D画面当中，画中的像素就相当于大语言模型中的分词，像素与像素之间、或者说是特征与特征之间存在长距离依赖关系，由此通过Transformer中的注意力机制把每个像素映射到对应的地方；而且，即便是某个摄像头的画面像素被暂时地遮挡，也可以根据依赖关系继续存在。Transformer的引入，使得BEV视角在自动驾驶领域得以实现；而3D空间的引入，也使得自动驾驶的思维方式更接近于真实世界。
- ◆ 2018年特斯拉自建了标注团队，人员规模超过 1000 人；随着数据的扩大，人员及成本压力较大。2020 年开始，特斯拉研发并使用了数据自动标注系统；在车辆行驶过程中，摄像头收集的路面信息，打包上传到服务器的离线神经网络大模型，由大模型进行预测性标注，再反馈给车端各个传感器；特斯拉进入“半自动标注”阶段。

图：特斯拉通过采集2D图像建立鸟瞰平面图



◆ 软件方面：

- 1) 2020年10月，特斯拉FSD Beta版本首次发布并开启内测；2021年初，马斯克宣布FSD Beta编号从V8.1开始。
- 2) FSD功能基本在V8版本中奠定；功能涵盖NOA导航辅助驾驶、Summon智慧召唤、Autopark自动泊车、识别交通灯和停车标志并作出反应、城市街道自动转向等。

1.2.3 算法3.0：通过 BEV+Transformer架构进行2D升维，数据标注进入“半自动”阶段

出现的问题：

1) BEV仍然是对瞬时的图像片段进行感知，汽车只能根据当前时刻感知到的信息进行判断，自动驾驶存在一定的安全隐患。例如，在感知时刻如果行人正好被汽车遮挡，则无法识别到穿行的行人；而人类司机在面对类似场景时，则会根据此前看到行人在穿越马路的记忆，能够意识到行人有继续穿越马路的意图，从而选择减速或者刹车避让。

2) 算法无法识别或认全所有事物，存在长尾情况。例如当自动驾驶遇上超载车辆，算法通常将其识别为一般的三轮车，但对车后拖载的货物，既不显示、也不识别；当自动驾驶的车辆进行超车变道时，极易发生剐蹭等事故。

图：算法无法识别超载三轮车的货物



1.2.4 算法4.0: Occupancy Network的应用降低计算复杂性, 时序信息的引入则将图像识别推向4D

(4) 2021年-2022年: 感知算法方面, 时序信息的增加和Occupancy Network的应用, 视频数据升至4维; 决策规划方面, 特斯拉开始向“Machine learning-based”倾斜; 软件方面, 得益于FSD进入公测、且公测范围不断扩大, V9/V10/V11版本加速更新优化。

- ◆ 2021年, 特斯拉感知网络架构引入了时空序列特征层, 使用视频片段, 而不是图像来训练神经网络, 为自动驾驶增添了短时记忆能力。时序队列的使用赋予了神经网络获得帧间连续的感知结果的能力, 与BEV结合后则使FSD获得了应对视野盲区和遮挡, 选择性地对局部地图进行读写的能力, 正因为有了这样的实时的局部地图构建的能力, FSD才能不依赖高精地图进行城市中的自动驾驶。
- ◆ 2022年, 特斯拉又将 BEV 升级到了Occupancy Network (占用网络), 由过去的2D真正升级为3D; 在Occupancy Network之下, 原本的 BEV 空间被分割成无数的体素, 即使无法识别物体的类别, 也能通过预测每个体素是否被占用来更好执行驾驶任务, 如估算单辆车或单个人在BEV网格图中将占多少个方块。

图: FSD具备实时的局部地图构建的能力

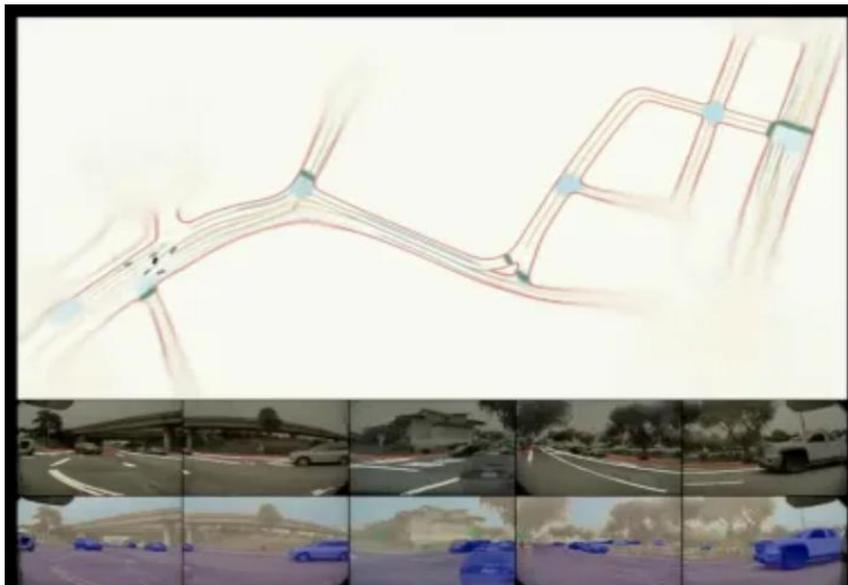
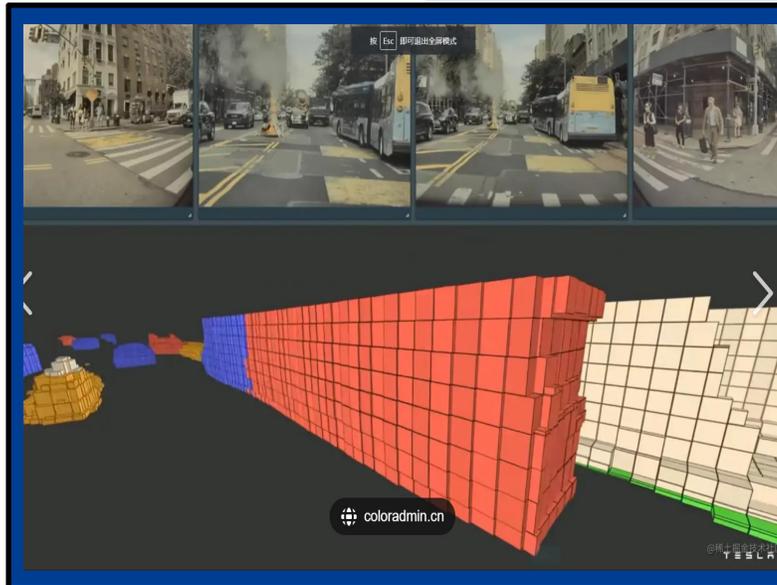


图: FSD采用占用网络的优势



- 1、在BEV空间生成了统一的体素, 可以预测任意一个体素的占用概率;
- 2、能够实时预测被遮挡物体的状态;
- 3、可以为每个体素预测其运动状态, 对随机运动进行建模;
- 4、获取了所有相机的视频流, 并且是统一的, 没有雷达与摄像头融合的问题;
- 5、得益于特斯拉的硬件, Occupancy Network具有高效的存储和计算优势

1.2.4 算法4.0: Occupancy Network的应用降低计算复杂性, 时序信息的引入则将图像识别推向4D

- ◆ 从画面中来看, Occupancy Network并不能识别周边物体具体是什么, 只显示大致轮廓, 但Occupancy Network具有很强的泛化能力, 可以在仅有少量标注数据的情况下, 实现高质量的物体检测和重建; 相较处理大规模的 3D 特征图可能会非常耗时和计算密集, Occupancy Network的应用能够有效降低计算的复杂性。与此同时, FSD基于光流法来判断时间流, 像素间的迁移也使得Occupancy Network最终带来的投影升级为4D。

图: Occupancy Network运行的显示过程

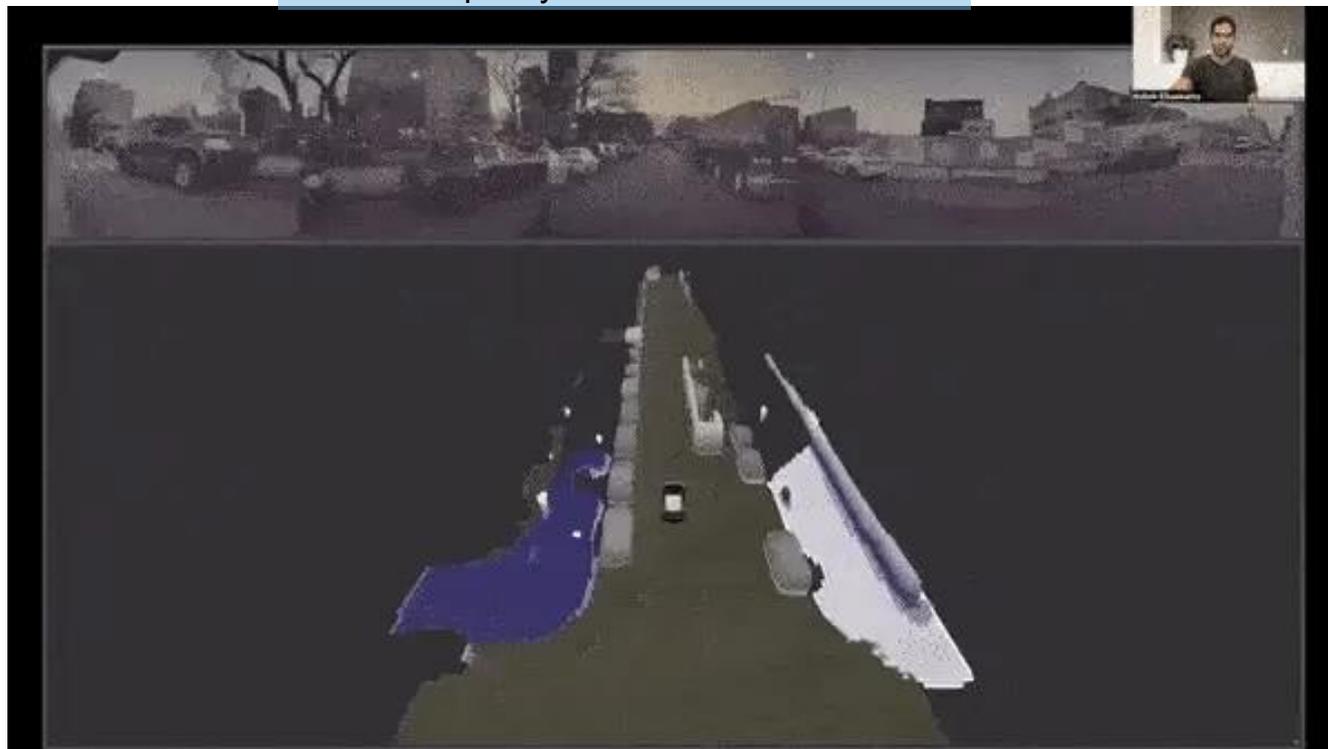
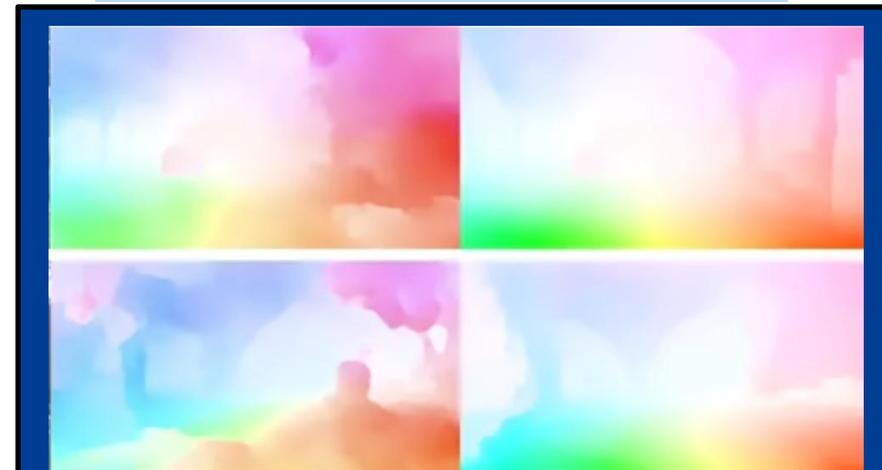


图: FSD基于光流法来判断时间流

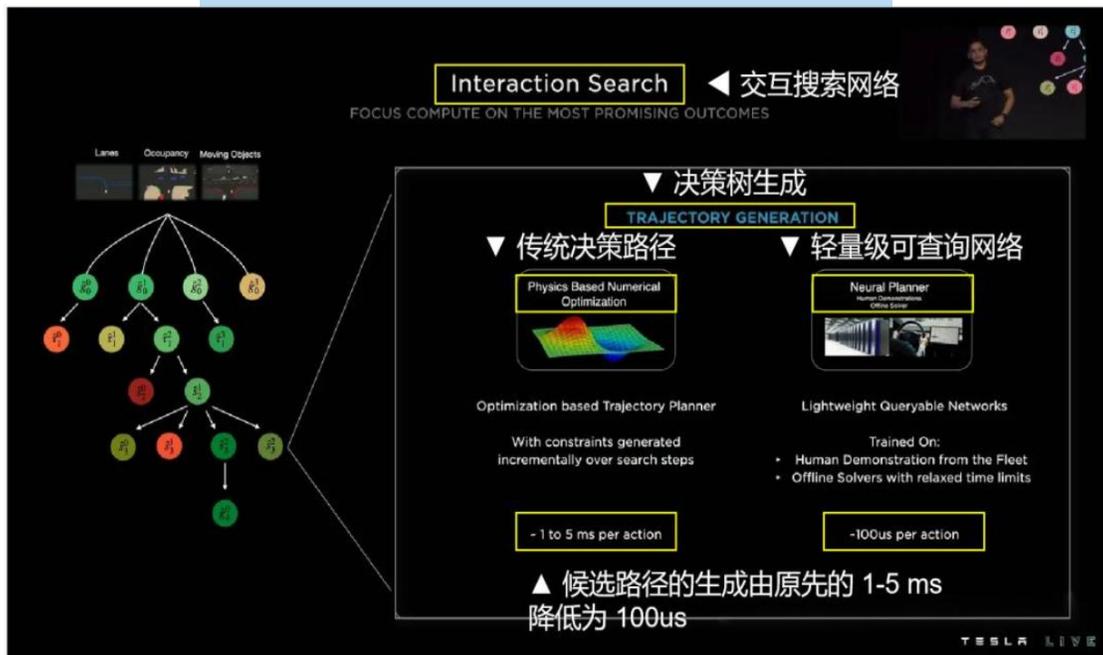


光流法:
假设构成某一物体的像素亮度恒定; 时间连续的前提下, 追踪两帧画面之间像素的迁移, 使得Occupancy Network最终带来的是4D投影

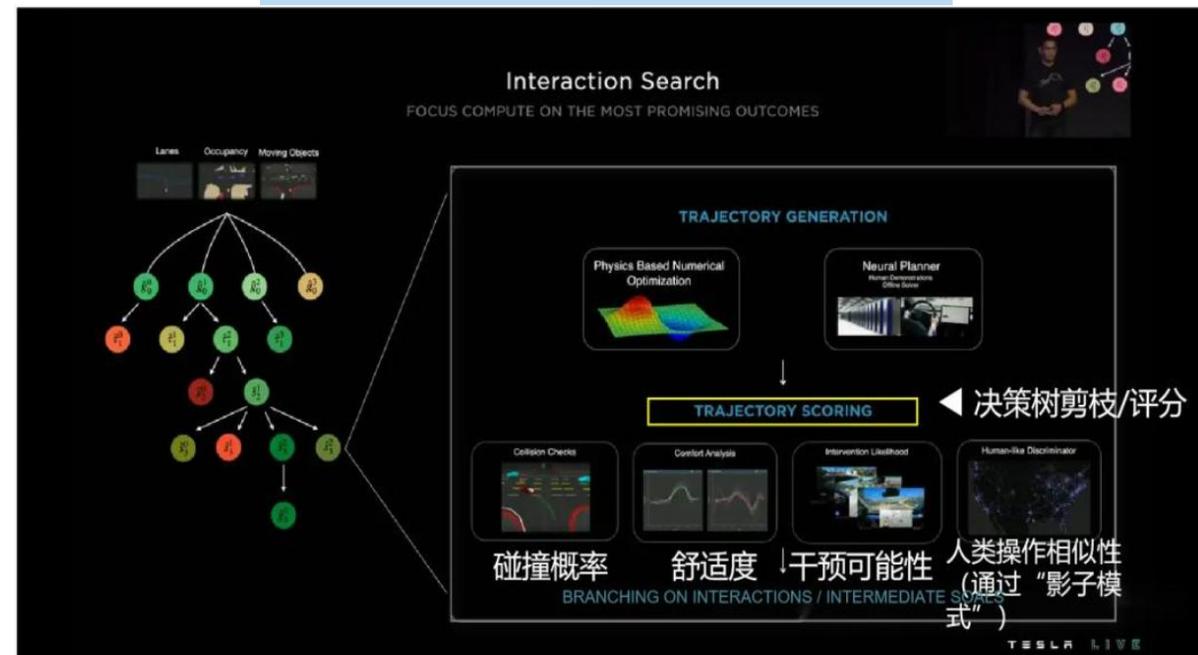
1.2.4 算法4.0: Occupancy Network的应用降低计算复杂性, 时序信息的引入则将图像识别推向4D

- ◆ 决策层面：2021年，特斯拉开始在路径规划层面部分加入神经网络的元素，推出“蒙特卡罗树搜索算法”，通过路径选择概率和局面评估来输出决策；但该阶段仅少部分使用神经网络，大部分依然是人工规则代码。2022年，新推出的“交互搜索网络”将蒙特卡罗算法结合应用到Occupancy网络中，计算出的每个轨迹都会有一个成本函数来优化树搜索给出候选目标较多等问题，该函数取决于碰撞概率、舒适度、干预可能性和人类操作相似性这四大因素；交互搜索网络成功将计算耗时从1到5毫秒降低到100微秒；但函数部分仍然是基于规则的代码。
- ◆ 软件方面：2021年马斯克宣布FSD Beta编号从V8.1开始。从大版本号升级来看，基本维持一年一更新的节奏；更新频率来看，则呈现较为明显的加速迭代，由期初的两月一更，逐步演变为每月两到三更、甚至每月四更。伴随着测试范围的扩大及驾驶数据的增加，V9/V10/V11版本主要聚焦在功能的优化上，不断加深智能驾驶的拟人化程度。

图：特斯拉“交互搜索网络”算法



图：特斯拉“交互搜索网络”算法

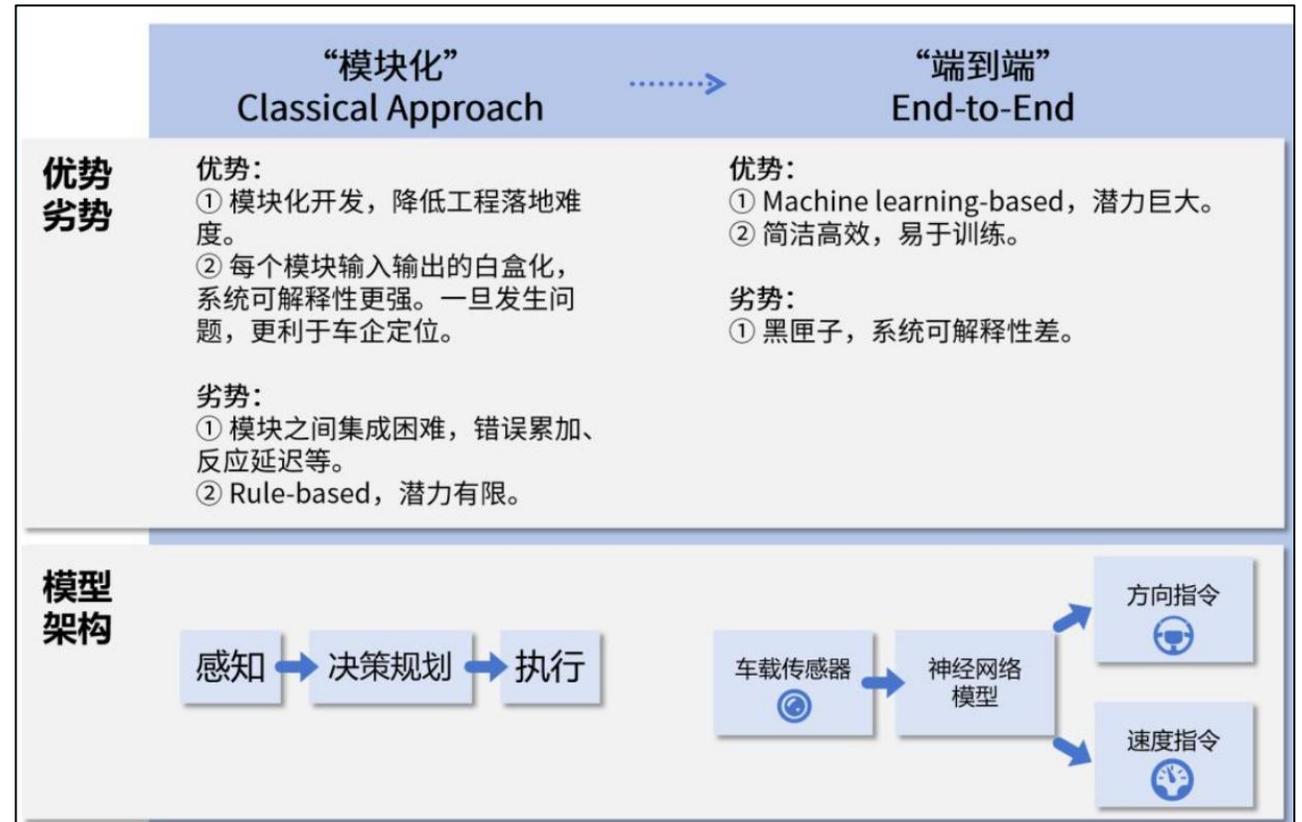


1.2.5 2024年感知决策规划大融合，“端到端”成为全局最优解

2024年1月，特斯拉推出FSD V12 Beta，算法进入“端到端”阶段；同时，FSD V12 Beta 是全球第一个实现“端到端”的AI自动驾驶系统（Full AI End-to-End）。

- ◆ 在此之前，特斯拉采取的“模块化”技术路线，即每个模块负责特定问题，独立进行开发和训练，然后再将不同模块系统集成以完成自动驾驶任务。而新推出的“端到端”技术路线实现了从多维传感器数据输入，直到操作指令输出的整个流程；一方面将感知、预测、规划的多模型组合架构变成了“感知决策一体化”的单模型架构，简化系统，减少错误传递，另一方面让神经网络完全代替了人工规则编写，替换掉了超过30万行C++代码，实现了从规则驱动到数据驱动的转变。
- ◆ 随后，国内多家企业跟进特斯拉采取“端到端”技术路线。1月30日，何小鹏表示小鹏智驾未来将实现端到端模型全面上车；蔚来也表示将在今年上半年推出端到端架构的主动安全功能；3月17日，元戎启行宣布已经成功将端到端模型适配到量产车上，该批量产车将于今年投入消费市场；此外，毫末智行也表示正在进行端到端模型的研发。

图：“模块化”与“端到端”优劣势对比与模型架构



1.3 硬件端迭代：高度依赖摄像头，对其他传感器则倾向于做“减法”

特斯拉于2014年推出FSD HW1.0，后续约2-4年更新一次（14年HW1.0，16年HW2.0，19年HW3.0，23年HW4.0）；目前，正处于向HW4.0的迭代阶段。

- ◆ **从硬件配置上，特斯拉FSD坚持纯视觉方案，高度依赖摄像头进行感知。**根据FSD HW1.0 - HW4.0配置对比分析来看，摄像头数量持续增加、由期初HW1.0的2颗增至最新HW4.0的12颗，同时清晰度也大幅提升、HW4.0摄像头已由过去的120万像素升级为500万像素。相对而言，特斯拉对其他硬件倾向于做“减法”，2021年5月曾宣布移除毫米波雷达（但受制于安全性等问题，HW4.0毫米波雷达回归），2022年10月宣布取消超声波雷达。
- ◆ **在端侧处理器方面，特斯拉持续增加配置、强化算力。**HW1.0阶段基于1颗Mobileye EyeQ3和1颗英伟达Tegra 3；HW2.0阶段切换到了由1颗英伟达Parker SoC和1颗英伟达Pascal GPU 组成的 NVIDIA DRIVE PX 2 计算平台；2017年的HW2.5阶段又在HW2.0基础上新增了1颗NVIDIA Parker SoC；HW3.0阶段特斯拉首次搭载2颗自研 FSD 1 芯片、内核数量为12；HW4.0自研芯片升级为FSD 2，同时提升至20核、内核数量提升66.67%。

图：特斯拉FSD硬件端迭代历程（简化版）

硬件代号	HW 1.0	HW 2.0	HW 2.5	HW 3.0	HW 4.0
发布时间	2014.09	2016.10	2017.08	2019.04	2023.01
核心处理器	Mobileye EyeQ3 x 1 NVIDIA Tegra 3 x 1	Nvidia Parker SoC x 1 Nvidia Pascal GPU x 1 英飞凌TriCore MCU x 1	Nvidia Parker SoC x 2 Nvidia Pascal GPU x 1 英飞凌TriCore MCU x 1	FSD1 芯片 x 2 (12核)	第二代FSD 2芯片 x 2 (20核)
摄像头数量	2	8	8	8	12
毫米波雷达	1	1	1	1	1
超声波雷达	12	12	12	12	0

1.3 硬件端迭代：高度依赖摄像头，对其他传感器则倾向于做“减法”

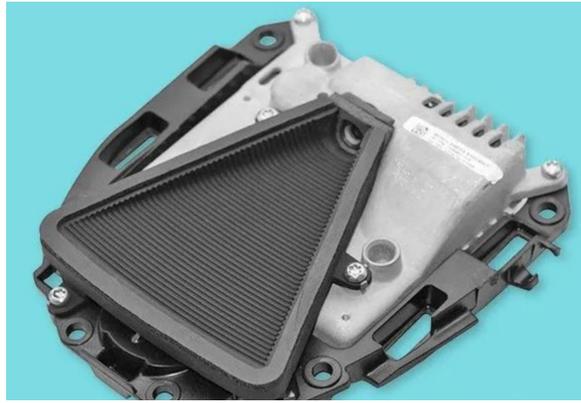
图：特斯拉FSD硬件端迭代历程

硬件代号	HW 1.0	HW 2.0	HW 2.5	HW 3.0	HW 4.0
发布时间	2014.09	2016.10	2017.08	2019.04	2023.01
核心处理器	Mobileye EyeQ3	Nvidia Parker SoC x 1 Nvidia Pascal GPU x 1 英飞凌TriCore MCU x 1	Nvidia Parker SoC x 2 Nvidia Pascal GPU x 1 英飞凌TriCore MCU x 1	FSD 1芯片 x 2 (12核)	第二代FSD 2芯片 x 2 (20核)
内存容量	256MB	6GB	8GB	8GB x 2	未知
闪存容量	-	-	-	4GB x 2	未知
处理能力	1 X	40 X	40X / 冗余	420X / 冗余	未知
每秒帧数	36	110	110	2300	未知
TOPS运算能力	0.256	12	12	144	未知
估计功率	25W	250W	300W	220W	未知
前置摄像头	1	均为一个三目摄像头（长焦250米、中焦150米、广角60米）			升级为12摄像头（1个冗余，可用11个）；摄像头像素从原来的120万提升到了500万，探测距离至少424米。
前侧摄像头	0	2（80米测距）	2（80米测距）	2（80米测距）	
后侧摄像头	0	2（100米测距）	2（100米测距）	2（100米测距）	
后置摄像头	1	1	1	1	
毫米波雷达	前向毫米波雷达（博世）； 160米测距	前向毫米波雷达（博世）； 160米测距	前向毫米波雷达（大陆）； 170米测距	前向毫米波雷达（大陆）； 170米测距	高精度4D毫米波雷达； 300米测距
超声波雷达	12（5米测距）	12（8米测距）	12（8米测距）	12（8米测距）	0
GPS	GPS+地图	GPS+地图	GPS+地图	GPS+地图	未知

1.3.1 HW1.0→HW2.0:算力平台处理能力提升40倍，摄像头数量增加4倍

(1) FSD HW 1.0: 应用层软件开发

图: 特斯拉硬件 HW 1.0



- 基于 **Mobileye芯片**的第一代驾驶辅助硬件;
- 使用了**单个前置EQ3系列摄像头、单个毫米波雷达、以及12个中程超声波传感器**; 其中, 毫米波雷达是由博世提供。
- HW1.0阶段特斯拉的主要工作是应用层软件开发。



(2) FSD HW 2.0: 图像识别算法+应用层软件开发

图: 特斯拉硬件 HW 2.0



- 基于 **英伟达芯片**的第二代驾驶辅助硬件;
- 使用**8个摄像头、单个毫米波雷达、以及12个远程超声波传感器**; 其中, 毫米波雷达仍然是博世产品。
- HW 2.0 阶段特斯拉掌握图像识别算法+应用层软件开发。

芯片供应商由Mobileye换为英伟达,
处理器能力提升:
内存容量由256MB增至6GB;
处理器的处理能力由1X 增至 40X;
每秒帧数由36帧/秒 增至 110帧/秒;
处理器功率由25W 增至 250W;

摄像头数量由2颗增加至8颗,
其中, 前置摄像头由单颗换为一个三目摄像头;

测距增加: 超声波雷达升级、测距由5米增至8米



1.3.2 HW2.0→HW2.5:毫米波雷达供应商更换, 新增哨兵模式等功能

(2) FSD HW 2.0: 图像识别算法+应用层软件开发

图: 特斯拉硬件 HW 2.0



- 基于**英伟达芯片**的第二代驾驶辅助硬件;
- 使用**8个摄像头、单个毫米波雷达、以及12个远程超声波传感器**;其中,毫米波雷达仍然是**博世**产品。
- HW 2.0 阶段特斯拉掌握图像识别算法+应用层软件开发。



(3) FSD HW 2.5: 图像识别算法+应用层软件开发

图: 特斯拉硬件 HW 2.5



处理器能力大幅提升:
内存容量由 6GB 增至 8GB;
处理器功率由250W 增至 300W;

传感器数量不变, 但毫米波雷达供应商由博世更换为大陆、测距由160米 增至 170米;

新增两个功能: 行车记录仪和带有本地保存视频的哨兵模式

哨兵模式:
能够在 Tesla 车辆停放并落锁后, 监控车辆周围的活动。如果检测到威胁, 车上的摄像头将开始记录, 警报将启动, 同时车主会收到来自 Tesla 应用程序的提示警报。

- 基于**英伟达芯片**的第2.5代驾驶辅助硬件; 相当于第二代版本的更新, 主要用于冗余和略微提高可靠性。
- 使用**8个摄像头、单个毫米波雷达、以及12个远程超声波传感器**; 传感器数量不变, 但改采用大陆毫米波雷达。
- 新增两个功能: 行车记录仪和带有本地保存视频的哨兵模式。

1.3.3 HW2.5→HW3.0: 启用自研的高度集成FSD一代芯片

(3) FSD HW 2.5: 图像识别算法+应用层软件开发

图: 特斯拉硬件 HW 2.5



- 基于**英伟达芯片**的第2.5代驾驶辅助硬件；相当于第二代版本的更新，主要用于冗余和略微提高可靠性。
- 使用**8个摄像头、单个毫米波雷达、以及12个远程超声波传感器**；传感器数量不变，但改采用大陆毫米波雷达。
- 新增两个功能：行车记录仪和带有本地保存视频的哨兵模式。



(4) FSD HW 3.0: 全套芯片设计+图像识别算法+应用层软件开发

图: 特斯拉硬件 HW 3.0



首次采用**特斯拉自研的自动驾驶芯片**，抛弃英飞凌/英伟达的产品，自研高度集成的SoC+MCU芯片

处理器能力大幅提升:

内存容量由 8GB 增至 16GB;
处理器的处理能力由40X 增至 420X;
每秒帧数由110帧/秒 增至 2300 帧/秒;
但处理器功率由300W 降至 220W;

驾驶辅助硬件和娱乐系统硬件集成在一个控制器中

- 基于**特斯拉芯片**的第三代驾驶辅助硬件；
- 使用**8个摄像头、单个毫米波雷达、以及12个远程超声波传感器**；传感器数量不变。
- Model 3将驾驶辅助硬件和娱乐系统硬件集成在一个控制器中，但电路设计没有高度集成，娱乐信息和自动驾驶是两块独立的电路板。

1.3.4 HW3.0→HW4.0: 摄像头数量新增50%，毫米波雷达以高精度4D版本回归

(4) FSD HW 3.0 (2019年3月) :
全套芯片设计+图像识别算法+应用层软件开发

图: 特斯拉硬件 HW 3.0



- 基于**特斯拉芯片**的第三代驾驶辅助硬件;
- 使用**8个摄像头、单个毫米波雷达、以及12个远程超声波传感器**; 传感器数量不变。
- Model 3将驾驶辅助硬件和娱乐系统硬件集成在一个控制器中, 但电路设计没有高度集成, 娱乐信息和自动驾驶是两块独立的电路板。

中间版本的变动更新:
2021年5月起, 分批移除不同车型装配的毫米波雷达;
2022年10月起, 取消超声波传感器

芯片升级:
HW4.0采用三星代工的**第二代FSD 7nm制程芯片**, 预估总算力在300Tops-500Tops左右, 基本可达到HW3.0硬件算力的3倍以上;

处理器升级:
CPU内核从12个增至20个, 这20个又分为5个集群, 每个集群里有4个内核, 最大频率为2.35GHz, 闲置频率为1.37GHz;
TRIP内核数量从2个增加到3个, 最大频率2.2GHz;

摄像头数量增加、像素升级: 摄像头数量由8颗增加至12颗; 新的摄像头模块像素为500万像素, 清晰度是上一代3.0的约4倍。
毫米波雷达回归, 采用高精度4D毫米波雷达、且毫米波测距由170米增至300米;
保持取消超声波传感器, 传感器数量减少

(5) FSD HW 4.0 (2023年2月) :
全套芯片设计+图像识别算法+应用层软件开发

图: 特斯拉硬件 HW 4.0



- HW4.0采用三星代工的**第二代FSD 7nm制程芯片**, 算力是HW 3.0的3倍以上。
- **CPU内核从12个增至20个**, 最大频率为2.35GHz, 闲置频率为1.37GHz;
- 使用**12个摄像头** (前置双目摄像头、新增了2个侧视摄像头、以及1个备用摄像头。) **单个高精度4D毫米波雷达、取消超声波传感器。**

1.3.4 HW3.0→HW4.0: 摄像头数量新增50%，毫米波雷达以高精度4D版本回归

HW 4.0版本中，毫米波雷达的回归主要为提升FSD现有的安全性及可靠性

- ◆ 此前弃用毫米波雷达的原因（1）一方面系传统毫米波雷达低分辨率造成融合感知性能下降；特斯拉人工智能总监曾表示，对于低分辨率雷达来说，通过类似立交桥这样的场景时，由于雷达的仰角分辨率很低，很难分辨出立交桥和下面停着的车辆，极易导致碰撞。（2）另一方面则系毫米波雷达信道数量限制了其感知能力的提升；相较而言，摄像头能够产生大量数据，软件的改进可以使这些数据得到最大限度的利用。
- ◆ 而对于毫米波雷达的回归，主要系（1）高精度4D毫米波雷达的分辨率大幅提升；2021年起，NXP、TI等雷达芯片方案商，以及大陆集团采埃孚、博世等雷达系统供应商都在加快推动4D成像毫米波雷达的量产落地；新的4D毫米波雷达分辨率性能大幅提升，具备点云输出（与视觉或激光雷达更好的融合，以及可能的分类识别能力）以及全天候等性能，成为了高阶方案的选择项之一。（2）能够弥补纯视觉方案的风险；特斯拉被大众诟病的“幽灵刹车”问题（毫无征兆地刹车），主要系传感器的感知缺陷造成的，由于夜间或大雾或大雨等恶劣天气条件下、摄像头的性能较差；同时，摄像头反应时间通常也较毫米波雷达长，往往需要几帧来识别物体的速度变化。而相对的，毫米波雷达根据发射频率和接收频率的差值测量距离、相对速度和方向，在夜间、逆光、雾、雨、雪环境下也能使用。

图: 低分辨率毫米波难以分辨立交桥与桥下停车

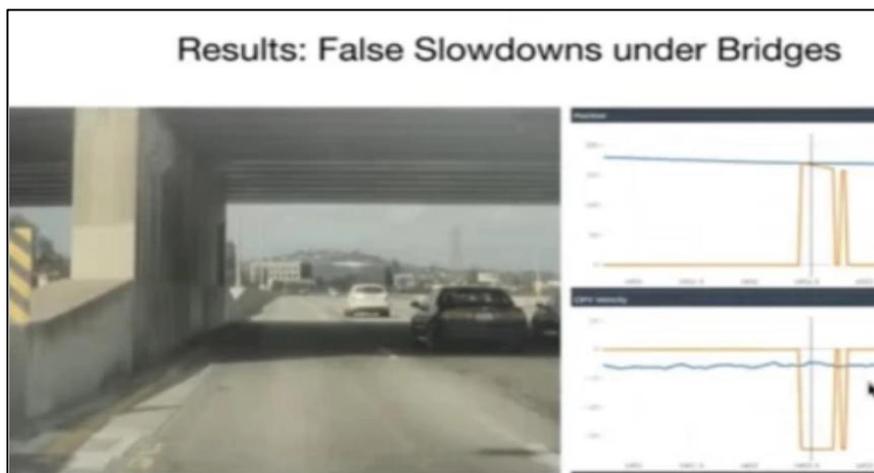


图: NXP与为升科联手发布的4D成像雷达方案

- ◆ 协同工作方面，同时进行短程和远程的测距，能够同时分辨前方200-300米处并行行驶的两车；
- ◆ 速度方面，能够确定车辆和物体各自的速度；
- ◆ 方位角方面，该款4D成像雷达可以提供小于1°的方位角分辨率，能够更好将这些物体彼此区分开；
- ◆ 仰角方面，能够计算出物体相对于路面的高度，然后确定车辆能否安全地通过被检测的物体，主要应用在探测道路上方的立交桥或其他桥梁。

02

解析特斯拉FSD

2.1 受益于数据量、算力、硬件适配度方面的领先，特斯拉FSD的技术竞争力较强

2.1.1 FSD驾驶决策的拟人化程度较高

2.1.2 FSD智驾的安全性、可靠性较为凸显

2.1.3 将纯视觉方案做到极致，有效节省了运算空间及成本

2.2 特斯拉FSD有待改进的方面

2.2.1 与同价位车型配备的智驾方案相比，FSD价格较高

2.2.2 纯视觉方案在恶劣天气等场景的性能略弱

2.1 受益于数据量、算力、硬件适配度方面的领先，特斯拉 FSD 的技术竞争力较强

(1) 数据量：AI模型的效果取决于输入数据的数量及质量，输入的优秀行驶数据越多，AI模型便能做出更适合、更优异的行驶决策。FSD自2020年10月开始北美地区内测，随着FSD推送地区及推送用户的增多，特斯拉拥有的行驶数据会呈指数级上涨；在数据量上，国内厂商的追赶难度较高。2024年4月，特斯拉宣布其全自动驾驶(FSD)技术助力下的汽车已经行驶了超过10亿英里、相当于16.1亿公里，而国内厂商方面，暂无达到该里程数的企业。

表：各车企智能驾驶方案的行驶里程数

车企	公布月份	公里数
特斯拉	2024年4月	行驶超过 16.1 亿公里（即10亿英里）
华为 ADS	2024年4月	总里程超过 2 亿公里
蔚来 NOP+	2024年3月	行驶总里程达到 8.49 亿公里
小鹏 NGP	2024年3月	行驶里程超过 7.3 亿公里
理想LCC及+NOA	2024年3月	总里程超过5.5亿公里
阿维塔 AVATRANS	2023年	累计行驶了1.6亿公里

图：特斯拉FSD的行驶里程数（单位：英里）



2.1 受益于数据量、算力、硬件适配度方面的领先，特斯拉 FSD的技术竞争力较强

(2) 庞大的算力中心：AI模型接受数据训练，是建立在算力平台上的，其计算能力及算力投入都是关键指标。

- ◆ 1) **算力方面**，小鹏基于阿里云打造的“扶摇”智能计算平台，算力可达600PFLOPS（每秒浮点运算60亿亿次），而2022年特斯拉算力中心的算力已经达到了 2 EFLOPS（每秒浮点运算200亿亿次）。未来，特斯拉自研超级算力平台Dojo投入使用后，其算力还将上升一个台阶；根据特斯拉2023年6月发布的算力发展规划，Dojo将在2024年10月达到100 EFlops算力。
- ◆ 2) **算力投入方面**，2022年特斯拉AI DAY上，马斯克表示目前特斯拉拥有超过14000颗GPU的超级算力中心；2023年8月，特斯拉启动了10000颗H100 GPU的新训练集群，H100 GPU的运算效能是前一代A100的五倍快，价格昂贵、单颗将近40000美元。与此同时，算力平台的后期维护成本还要远高于硬件成本；马斯克曾公开表示，2023年特斯拉花在扩大训练运算算力的预算就超过20亿美元，并表示2024年会采取同样的行动；相较而言，国内厂商的算力投入与特斯拉仍存在较大差异。

车企	算力中心算力	算力投入	2023年研发投入
特斯拉	<ul style="list-style-type: none"> 2022年 2 EFLOPS 预计2024年10月达100EFlops 	超20亿美元/年	40亿美元
问界	<ul style="list-style-type: none"> 华为2024年4月云端算力达3.3 EFLOPS 	-	44.38亿元（赛力斯）
蔚来	-	-	134.31亿元
小鹏	2022年600 PFLOPS（每秒浮点运算60亿亿次）	2024年其将投入35亿元用于智能研发，并投入超7亿元用于算力训练	52.77亿元
理想	2023年预计至少 750 PFLOPS（每秒浮点运算 75 亿亿次）	-	105.86亿元

图：特斯拉算力中心



2.1 受益于数据量、算力、硬件适配度方面的领先，特斯拉FSD的技术竞争力较强

(3) 适配度高的自研硬件解决方案：

- ◆ 特斯拉从2016年2月组建芯片团队，到2019年4月成功推出FSD芯片，历时三年之久推出HW硬件解决方案。自研的HW3.0是第一款完全出自车企的自动驾驶硬件解决方案，同时也是量产车型上目前深度学习理论性能最强的方案；而目前，HW已经进化到了4.0时代。
- ◆ 自研硬件的优势，首先是性价比高、利用率高，大幅降低FSD的硬件成本；其次是开发自由度高，更能支持特斯拉的创新性算法及其他相关技术方案。相较来看，大部分国内厂商采用外购芯片方案，在适配度及利用率上，都与特斯拉自研硬件解决方案存在一定的差距。

图：特斯拉HW系列自动驾驶硬件解决方案



2.1.1 FSD驾驶决策的拟人化程度较高

- ◆ 此前，特斯拉 FSD V11与大部分智能驾驶系统一样，速度控制生硬，处理突发情况时会突然刹车或加速，并带有明显的机械感；而FSD V12 通过端到端训练学习使得智能驾驶更拟人化、驾驶决策更为合理。体验过特斯拉FSD V12的赛博汽车平台博主「EatElephant」列举了以下方面：

- “V11在速度控制上还较为生硬，一旦有机会便会尽可能迅速加速达到设定限速，给人感觉略微**机械**。”

A 速度与转向控制

- “V12 速度和转向控制非常丝滑平顺；即使是坐在后排，在红绿灯启停以及路口转弯过程中几乎都**感觉不到顿挫**。”

- “面对右前方的骑行人的场景，V11会对骑行人**过度小心**，规划出一条大幅绕行路线。”
- “在直行遇到前方远处左转的车辆时，V11的反应是**明显减速**。”

B 路上与其他参与者交互

- “V12**绕行幅度非常接近人类**驾驶员的选择，速度控制和果断程度也非常合理，**并没有异常急刹**的情况出现。”
- “V12能够准确判断出前方车辆线路和速度，以合适的减速让车上乘客几乎无感的同时又留出了足够的安全冗余空间。”

图: 特斯拉流畅的转向控制



C V12如何掉头、过环岛

- “V12环岛前**让车与否的决策更加果断**，在停车场中与行人的交互流畅安全。”
- “对横向穿行速度较快的无保护转弯，V12能够耐心等待时机，并且速度控制也较V11更为优秀，有时候**能够不完全刹停，保持蠕行，还能较早进行预加速**，保持通行高效。”

D 视觉的测距能力

- “考虑到了FSD是纯视觉，对尺寸的把握是纯视觉的弱项；V12体验中遇到了美国城市里比较常见的路边停车导致道路过窄，但V12非常**果断的从狭窄的道路上和对向会车通过。**”

E 长尾场景处理

- “特斯拉 FSD V12 不仅能够识别并绕过路面上的铁皮等障碍物，还能在道路施工时**根据引导标识在临时开辟的道路上行驶。**”
- “即使需要驶向对向车道，也能够**不受逆行标识和中心黄线的限制。**”
- “在夜间行驶时，它能够像人类一样先右转驶入两辆靠边的停车之间巧妙的避让对向来车，待对向来车驶离后再向左打方向盘继续前进。”
- “最后一段测试由于是在San Jose晚高峰，高速岔路上启用了流量控制信号灯，分别有三个红绿灯控制三条汇入车道；V12可以理解三个红绿灯分别控制的车道，在自己车道红灯时等待，变绿后立即加速汇入主路，毫无迟疑。”
- 同时，FSD V12 还展示了一些类似智慧涌现的能力。在测试中，路口前有一个车道，V12 无法使用倒车档完成掉头；在乘客等待时，V12 发现了一个小停车场，**果断不遵守导航路线、绕道而行**，尝试代替标准掉头。这一行为是自动驾驶技术中的一次重大突破，因为通常系统会严格遵循导航路线，自行偏离导航的行为几乎不可接受。

2.1.2 FSD智驾的安全性、可靠性较为凸显

◆ FSD的安全性、可靠性的优势较为凸显：

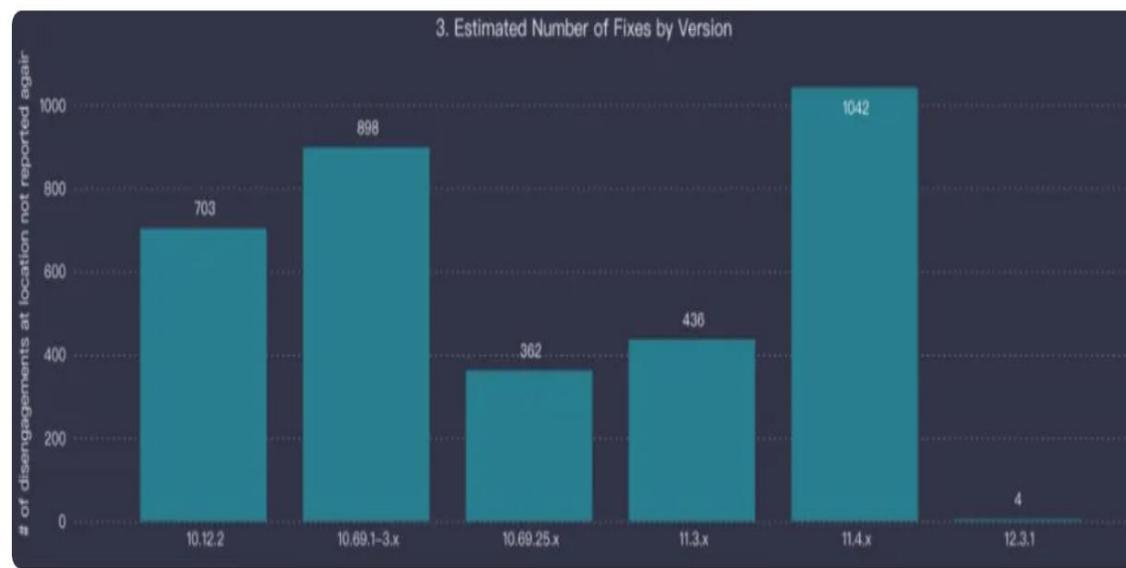
(1) 安全性方面，根据特斯拉公开的最新安全数据，特斯拉车辆在开启 FSD 功能后，每行驶 539 万英里才可能发生一起事故，远低于全美平均水平——每行驶 67 万英里即有一起事故；在自动驾驶模式下，特斯拉的安全系数相当于美国一般驾驶员的 8.04 倍，即便是基础驾驶状态下，特斯拉车辆的安全水平也高出大约 1.49 倍。

(2) 可靠性方面，V12.3 版本在城市环境下的无关键接管行驶里程较此前版本大幅增加，从约100多英里（约合160公里）提升到了386.7英里（约合 622 公里）；相比之下，同济大学教授、汽车学院副院长熊璐曾表示，北京、上海、广州等地的自动驾驶企业，基本上每行驶十几或几十公里就需要人工接管一次。

图：城市中多少里程发生一次关键接管的数据



图：各个版本与地点相关的持续性问题的统计数字



2.1.3 将纯视觉方案做到极致，有效节省了运算空间及成本

- ◆ **从算法端来看，2022年推出的Occupancy Network，在较大程度上降低了运算难度。**正如前面所提到的，占用网络并不能识别周边物体具体是什么，只显示大致轮廓；但占用网络具有很强的泛化能力，可以在仅有少量标注数据的情况下，实现高质量的物体检测和重建；相较处理大规模、高精度的3D特征图，占用网络的应用能够有效降低计算的复杂性。**此外，FSD V12实现了“端到端”神经网络的落地，能够有效提升运算效率。**马斯克在直播中表示，FSD V11版本有超过30万行的C++代码，而V12版本只有2000+行。这让FSD的运算灵活了不少，同时也可以脱离网络，在离线情况下进行运算。马斯克还表示，按推理，V12版本的运算功率只有100W。更少的代码也增加了系统的稳定性，让车辆智能驾驶更加安全。
- ◆ **从硬件端来看，纯视觉方案下，FSD V12更像是一个人类的大脑，99%的决策都是由神经网络给出的，无需采购成本较高的高精地图和激光雷达，**就能分析思考、输出车辆控制指令（如转向、加速、制动等）。1）早期的机械式激光雷达价格动辄十万美元起，随着电子行业的发展及智驾领域的内卷，激光雷达价格有所降低，但基本维持在上百或上千美元级别；2023年，速腾聚创来自ADAS应用的激光雷达产品折算单台价格约为3197.53元，较单颗几十美元的摄像头价格高出不少。马斯克曾评价“Lidar is a fool’s errand”，认为激光是一项价格昂贵但毫无用处的技术。2）高精地图方面，业中高精地图的价格大都在300元每年每辆车，一辆车从研发到最终量产，高精地图大概需要2100元成本。
- ◆ 然而，根据路咖汽车预计，特斯拉采用纯视觉方案，HW3.0版本全车8个摄像头（120万像素、单颗成本150元左右），摄像头硬件成本合计约为1200元；假设以HW4.0版估计，全车12个摄像头（500万像素、单颗成本增至300元）、摄像头成本增至3600元，外加单颗价值500-600元的4D毫米波雷达，合计成本约4100-4200元。

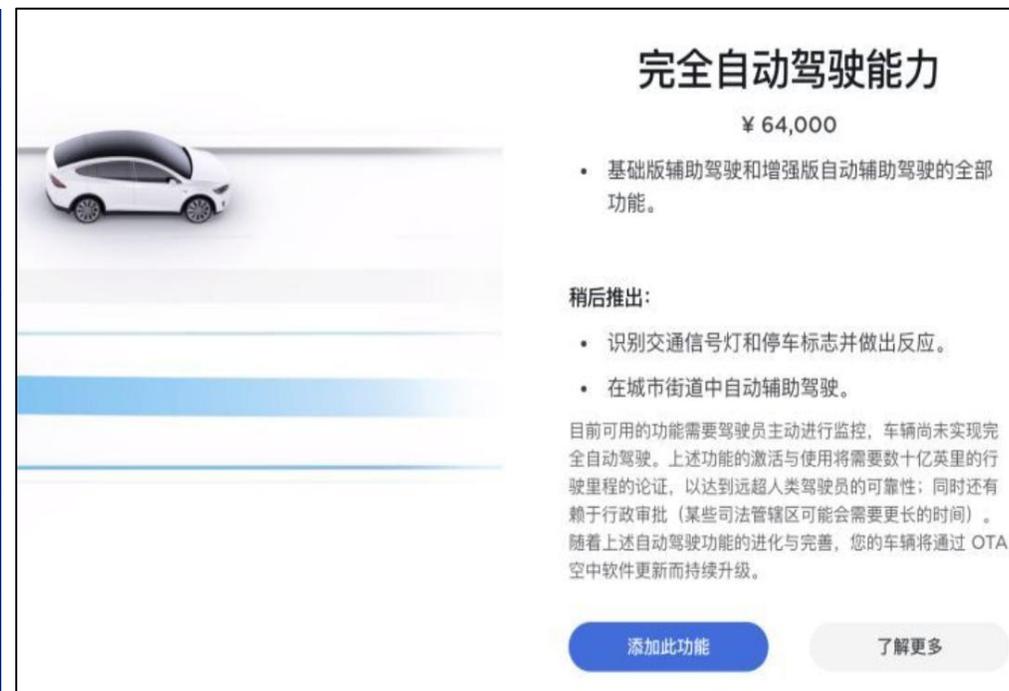
2.2.1 与同价位车型配备的智驾方案相比，FSD价格较高

- 对比目前市面上大部分配备高阶辅助驾驶技术的车型，特斯拉销售主力车型MODEL Y的售价相对偏低，但FSD的买断价远超竞品价格；**特斯拉FSD在中国的买断价格为6.4万元，比问界的ADS 2.0高出43%**，另外包括理想、小鹏、极氪等部分车型已开启不额外收取智驾包费用的模式。

图：各车企智驾包的订阅价及买断价

主流车企	热门车型售价	订阅版价格	买断版价格
特斯拉 (FSD)	MODEL Y 24.99万	99美元/月	64000元 (中国区) 8000美元 (海外)
问界 (高阶智能驾驶系统 ADS 2.0)	问界M7 24.98-32.98万	720元/月 7200元/年	36000元
蔚来 (NAD)	ES6 33.8-39.6万	680元/月	-
理想 (NOA)	L7 30.18-35.98万	免费 (已含在车价中)	免费
小鹏 (Xpilot 4.0)	P7 20.99-33.99万	免费 (已含在车价中)	免费
极氪 (NZP)	极氪001 26.9-40.3万	免费 (已含在车价中)	免费

图：特斯拉FSD智驾包在中国的推荐界面

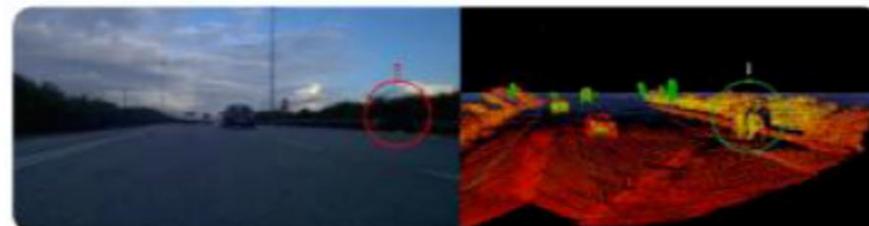


2.2.2 纯视觉方案在恶劣天气等场景的性能略弱

- ◆ 摄像头在极端天气或光线不佳情况下、其检测能力不及激光雷达；
- ◆ 作为与人眼相似的视觉算法，硬件端摄像头受制于其自身特性，易受到光照影响，尤其在极端天气或者光线不好的情况下极易造成误判。之前特斯拉车型在开启AutoPilot后，经过立交桥或者普通桥梁之下时偶发突然自动刹车的情况，就是因为算法将摄像头里突然出现的阴影当做障碍物导致的。
- ◆ 与基于摄像头解决方案不同，激光雷达解决方案通过提供周围物体的精确距离测量，使机器能够看到3D图像。激光雷达解决方案使用一系列激光器，以光速测量环境中的距离；在暗光条件下，激光雷达也比相机表现更好，产生的误差更少。
- ◆ 根据美国汽车协会的一份报告，目前的摄像头行人检测系统在保护行人和自行车方面相对无效，尤其是在夜间；而激光雷达系统在白天和晚上都能很好地探测行人，因为激光雷达系统通过激光束提供自我照明。

图：各极端场景下，摄像头与激光雷达的视觉对比

阴影处



雨天



阳光直射



2.2.2 纯视觉方案在恶劣天气等场景的性能略弱

- ◆ 2024年4月底，美国国家公路交通安全管理局（NHTSA）发布了一项新规则，要求所有新车和轻型卡车必须在2029年前配备先进的高速自动紧急制动系统（AEB），包括行人AEB（PAEB）系统，且这些系统能在夜间工作；这意味着特斯拉很难保证纯视觉自动驾驶方案在恶劣环境下的安全性，包括NHTSA要求的夜间环境、雨雾天气。
- ◆ 特斯拉自身似乎也意识到这个问题，近年来反复对FSD纯视觉技术的可靠性做验证和对比。2024年5月10日消息，美国激光雷达制造商Luminar Technologies在其致股东的信函中提及，特斯拉是其2024年第一季度最大的激光雷达产品客户；当季特斯拉贡献了Luminar超过10%收入，根据该公司本季度2100万美元的收入估算，特斯拉采购了价值210万美元的激光雷达（假设单颗激光雷达价值1000美元、单辆车装备1颗激光雷达，本次采购仅占2023年特斯拉全球汽车交付量的0.12%）；同时，Luminar还透露，自2021年开始特斯拉就从Luminar陆续采购过激光雷达产品，但采购数量并不大。
- ◆ 此外，包括马斯克自身对激光雷达的态度也有所转变；马斯克曾在Clubhouse的音频聊天室露面时，承认自己对激光雷达“出言不当”，且Space X就有在内部搭载激光雷达。

图：64 线激光雷达



03

特斯拉FSD进入中国市场的进度

3.1 特斯拉FSD入华或成关键议题

3.2 FSD进入中国场所面临的阻碍

3.2.1 或因缺乏冗余设计，FSD自动驾驶功能评级停留在L2级别

3.2.2 数据安全问题阻碍FSD在中国市场全面推广

3.3 特斯拉为FSD进入中国场所做的相应举措

3.4 FSD销售预期展望

3.1 特斯拉FSD入华或成关键议题

- ◆ 2024年4月28日，应中国贸促会邀请，马斯克抵达北京，先后与中国外交部、工业和信息化部、商务部、中国国际贸易促进委员会的相关领导会面，并前往上海特斯拉超级工厂；多方猜测，或由于经济不确定性导致特斯拉的核心电动汽车业务采用速度放缓，特斯拉的核心电动汽车业务陷入困境，寄希望于通过采用其 FSD 软件套件来获得经常性高利润收入。在此之前，马斯克曾在特斯拉第一季度财报电话会议上表示“我们计划在监管机构的批准下，将其作为受监管的自治系统发布到任何我们可以获得监管机构批准的市场，我们认为其中包括中国。”
- ◆ 截止目前，特斯拉在中国已推出两种 EAP（增强版自动驾驶）订阅选项，包括月包 699 元和季包 1399 元，而一次性购买为 32000 元，这将有利于现有特斯拉车主提高软件与服务的使用率，为即将推出的 FSD 以及机器人出租车业务做好准备。
- ◆ 5月30日有报道称，特斯拉即将在中国注册其全自动驾驶软件 FSD；如果特斯拉成功向中国工业和信息化部注册FSD软件，特斯拉员工将可在中国的公共道路上进行FSD的内部测试，并计划在未来几个月内升级推送给中国用户。

图：特斯拉（中国）新推出两种EAP订阅选项



出游季 体验行 增强版自动辅助驾驶尝鲜包 全新上线

增强版自动辅助驾驶 (EAP)

月包 699 元

季包 1,399 元

配备基础版自动辅助驾驶功能且未购买 EAP/FSD 的车辆，
可前往 [Tesla App](#) - [升级](#) - [软件升级](#) 页面，特享尝鲜体验价。

3.2.1 或因缺乏冗余设计，FSD自动驾驶评级停留在L2级别

(1) 或因缺乏冗余设计，特斯拉FSD自动驾驶功能评级停留在L2级别

◆ 2021年，市场监管总局（标准委）发布了针对自动驾驶功能的《汽车驾驶自动化分级》国家推荐标准（GB/T 40429-2021）；根据工信部相关规定，只有L3级及以上等级的驾驶自动化才能称之为自动驾驶，L2级及以下只能被称之为辅助驾驶。从L2到L3：

1) 第一大区别在于驾驶员身份的变化；L3级别自动驾驶车辆中的驾驶员，从L2上的“传统驾驶员”转变为“动态驾驶任务后援用户”，仅需要在系统失效或者超过工作条件时对故障汽车进行接管，因此非接管路段的相关交通事故转由车企负责，在一定程度上降低了车主的风险。

2) 其次，具备3级自动驾驶系统的汽车，将有条件实现TJP交通拥堵辅助功能；指在拥堵的高速公路或城市快速路上，驾驶员可以放开双手双脚，同时注意力可在较长时间内从驾驶环境中转移，做一些诸如看手机、接电话、看风景等活动。

图：SAE发布自动驾驶汽车“驾驶自动化等级”

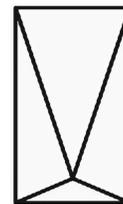
SAE INTERNATIONAL SAE J3016™ 自动驾驶等级

	SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
驾驶员坐在驾驶座上需要做什么？	无论何时使用驾驶辅助功能，您必须处于驾驶状态 即使双脚离开踏板，也没有控制方向盘			当使用自动驾驶功能，您无需驾驶汽车 您仅仅是坐在“驾驶座”上		
	您必须时刻观察各种情况 您需要主动制动、加速或者转向，确保安全			当功能请求时， 您必须驾驶汽车	这些自动驾驶功能 不需要您接管驾驶	
具有哪些功能特征？	以下是辅助驾驶功能			以下是自动驾驶功能		
	仅提供警告 以及瞬时辅助	能够制动、 加速 或 转向， 辅助驾驶	能够制动、 加速 和 转向， 辅助驾驶	可以在有限的条件下 驾驶车辆， 除非满足所有条件， 否则不会运行		可以在 任何条件下 驾驶车辆
功能示例	▪ 自动紧急制动 ▪ 视觉盲点提醒 ▪ 车身稳定系统	▪ 车道偏离修正 或 ▪ 自适应巡航	同时进行 ▪ 车道偏离修正 ▪ 自适应巡航	▪ 在交通拥堵的 情况下自动驾驶	▪ 城市中“机器人出租车” ▪ 踏板、转向装置可能无需安装	▪ 与L4相似， 但是可以在 任何条件下 进行驾驶

若您需要更详细的信息，请访问下载 SAE J3016 最新标准：https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/

3.2.1或因缺乏冗余设计，FSD自动驾驶评级停留在L2级别

- ◆ 目前，包括奔驰、宝马、比亚迪、长安汽车、极狐汽车、深蓝汽车、阿维塔在内的整车企业已于2023年底官宣获得了有条件自动驾驶（L3级）的道路测试牌照。



2023年
11月17日

四部委联合正式发布了《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知》，明确搭载L3级和L4级自动驾驶的车辆允许在限定区域内开展上路通行试点。

2023年
12月14日

宝马集团宣布，搭载L3级别自动驾驶功能的车辆，在上海市正式获得高快速路自动驾驶测试牌照

2023年
12月18日

梅赛德斯-奔驰官方宣布获批北京市有条件自动驾驶（L3级）高速公路道路测试牌照

智己汽车搭载L3级别自动驾驶功能的车辆，在上海市正式获得高快速路自动驾驶测试牌照

2023年
12月21日

极狐汽车官方宣布，已成功获得北京市有条件自动驾驶（L3级）高速公路道路测试牌照

2023年
12月22日

长安汽车宣布已于日前拿到17张高快速路的L3级自动驾驶道路测试牌照

深蓝汽车、阿维塔也宣布成为首批获批高快速路有条件自动驾驶(L3级)测试牌照的企业

2023年
12月27日

比亚迪官宣已于7月21日获得深圳市高快速路段有条件自动驾驶（L3级）测试牌照，成为拿到全国第一张有条件自动驾驶（L3级）测试牌照的企业。

2023年
12月29日

华为和赛力斯联合打造的**问界M9**成功获得L3级自动驾驶测试牌照；赛力斯此次一共获得11张自动驾驶测试牌照

3.2.1或因缺乏冗余设计，FSD自动驾驶评级停留在L2级别

- ◆ 可以看到，目前国内已经通过L3测试的车企品牌基本采用多传感器的冗余设计，即系统具备一套备份系统，当主系统出现故障时，备份系统可以启动并持续运行，从而保证车辆在出现故障的时候，还能继续运行，并辅助车辆行驶至安全的区域，同时也弥补了单一传感器的语义不确定性；像问界、奔驰、宝马等车企以激光雷达设计为主，而像长安汽车、深蓝在没有激光雷达的情况下，则倾向于高精地图解决方案。
- ◆ 在不用激光雷达以及高精度地图的情况下，特斯拉HW3.0版本的自动驾驶功能或只能达到L2级别，仅作为自动驾驶辅助功能。然而值得注意的是，特斯拉正在考虑更优的解决方案以提升自动驾驶的安全性及可靠性：1) 毫米波雷达在FSD HW4.0中已作为高精度4D毫米波雷达回归（预留接口，暂未量产上车），或在一定程度上能够替代激光雷达以弥补纯视觉方案的风险，保障自动驾驶在夜间或大雾或大雨等恶劣天气条件下的正常使用。2) 同时，近年来特斯拉陆续采购Luminar激光雷达做可靠性检测；虽然对激光雷达是否回归暂时无法得知，但能看出马斯克对激光雷达的态度是有所转变的。

主流车企	特斯拉 (HW4.0)	问界 M9	奔驰	宝马	智己 LS7	长安汽车 UNI-T	极狐	深蓝 SL03	阿维塔
搭载系统	FSD	华为ADS 2.0高阶智驾系统	Drive Pilot	BMW personal Pilot L3	IM AD	-	华为ADS 2.0高阶智驾系统	L3级交通拥堵自动驾驶系统	华为ADS 2.0高阶智驾系统
摄像头	12	11	6	有（未披露数）	11	6	13	5	13
激光雷达	-	1	1	有（未披露数）	2	-	3	-	3
毫米波雷达	1	7	5	有（未披露数）	5	5	6	3	6
超声波雷达	-	12	12	有（未披露数）	12	12	12	6	12
偏向有/无高精地图	无图	无图	有图； HERE（诺基亚开发）	有图； HERE	有图	有图； ADAS地图	无图	有	无图

3.2.2 数据安全问题阻碍FSD在中国市场全面推广

(2) 数据安全问题始终是阻碍特斯拉在中国全面推广FSD软件系统的主要原因。

- ◆ 由于感知类数据的采集、存储、处理等可能记录周边位置的视觉图像，一旦数据被滥用或恶意使用，将会对国家安全带来巨大风险。
- ◆ 过去为规避数据安全等问题，也为了节约成本较大的地图授权费，特斯拉采取的是不依靠“高精地图”的纯视觉自动驾驶方案，把用作仿真训练的“短时路网”保存在国内的服务器上。然而严格来看，高精地图是直接将周边环境“画好”交给系统，而摄像头和激光雷达则是用笔在现场“素描”，无论哪种自动驾驶方案，都属于“测绘”行为；特斯拉纯视觉方案利用现役车辆，完成大范围的地图构建、绘制出场景数据，未来或将成为军事目标、关键敏感目标等地理坐标数据泄露新的风险点。
- ◆ 在国内，特斯拉车辆是被禁止驶入某些重点敏感区域的，包括医院、学校和部分小区；较为敏感的国有企业以及相关机构的人员也都不得使用特斯拉汽车。尽管马斯克在第一时间解释称：“特斯拉不会将数据用于间谍活动，特斯拉愿意使用最高等级保密措施保护数据安全。”但疑虑并没有因此打消。

图：国内出现的特斯拉禁止入内的标志



图：特斯拉FSD通过摄像头实时描绘周边环境



3.2.2 数据安全问题阻碍FSD在中国市场全面推广

- ◆ 此前，针对自动驾驶汽车收集数据、训练算法，监管没有明确界定性质；直至2022年8月31日，自然资源部印发了《自然资源部关于促进智能网联汽车发展维护测绘地理信息安全的通知》，明确了智能网联汽车集成了相关传感器后，采集的相关信息数据进行采集、存储、传输和处理的行为，都是属于测绘活动，需依照《中华人民共和国测绘法》进行管理，且以特斯拉为代表的外资企业不能申请测绘资质，只能委托有资质的第三方。
- ◆ 其次，据上述法规规定，外资企业向境外传输包含地理信息的数据需经过审批；因此，特斯拉自2021年以来在华收集的所有驾驶数据目前均存储于上海，且未传输至美国，或在一定程度上阻碍智驾算法的培训。无论是道路环境、交通规则均与美国存在较大差异，过去的行驶数据对国内价值相对有限；有业内专家指出，中国交通状况比其他市场更为复杂，中国道路上的行人和自行车骑手更多，FSD若拟在中国市场开展应用，亟需采集存储国内数据传输至国外用于模型训练，加速培训智能驾驶算法。

图：特斯拉FSD在美国旧金山试驾的路况



图：小鹏智驾在广州城区试驾的路况



VS

3.3 特斯拉为FSD进入中国场所做的相应举措

(1) 特斯拉借力百度，获得测绘牌照及车道级导航地图

- ◆ 2024年4月29日消息，特斯拉或与百度达成合作，后者将允许特斯拉获得其在中国公共道路上收集数据的地图牌照，为FSD在中国的推出清扫监管障碍；同时，作为双方协议的一部分，百度还将向特斯拉提供其车道级导航系统。
- ◆ 6月7日消息，百度地图V20真车道级导航全球首发，并在特斯拉所有搭载AMD车机芯片的S3XY车型上线，意味着两家公司的合作顺利推进。

(2) 特斯拉拟在中国境内建立数据中心

- ◆ 2024年5月19日消息，特斯拉正在考虑在中国建立数据中心，收集和处理自动驾驶数据，以更好地适应中国复杂的交通条件，并利用大量场景数据来加速训练自动驾驶算法，推动FSD的全球部署战略；此外，特斯拉还与美国芯片巨头英伟达进行了谈判，双方正在讨论为中国数据中心购买图形处理器的问题。

图：百度车机版真车道级导航地图V20



但是也要比高德地图那种普通的导航

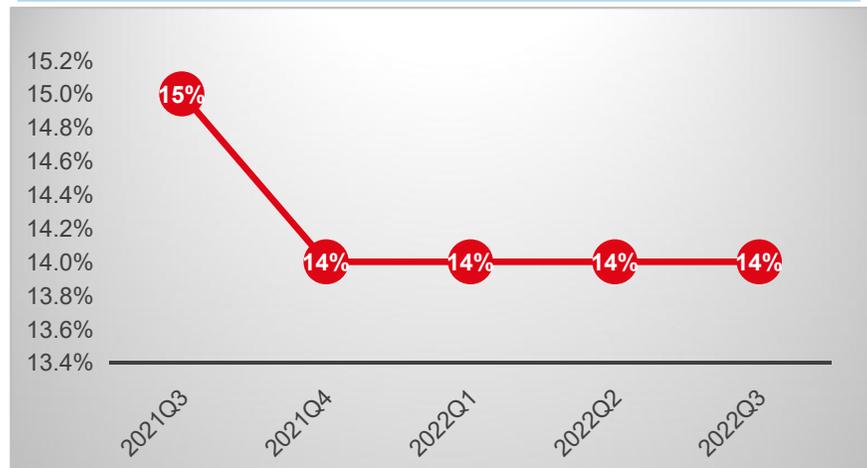
3.4 FSD销售预期展望

◆ 根据市场调研机构Marklines的数据，截至2023年2月底，特斯拉在北美市场保有量约为185万辆，加上2023年特斯拉在美国新增交付的65万辆，截至2023年年底北美市场现役特斯拉约有250万辆；其中，截至2024年3月，北美累计测试车辆数约达180万辆。而活跃付费用户方面，特斯拉曾在2024年一季度财报电话会中表示，“我们观察到大约有一半的人正在使用这项技术，且这一比例还在持续增长，每周都有所提升。”据上述数据估算，2023年FSD在北美的渗透率约为36%，远高于2021Q3-2022Q3外网统计的14%渗透率。

◆ 从2013年的2500辆开始，特斯拉在中国市场的销量逐年攀升；截止2023年年底，特斯拉在中国市场的累计销量超过170万辆。

- 假设FSD在现役中国特斯拉汽车中渗透率5%，预计新增收入54.4亿元；（目前仅披露中国市场买断价6.4万元/辆）
- 假设FSD在现役中国特斯拉汽车中渗透率10%，预计新增收入108.8亿元；
- 假设复刻FSD在北美第一年公测情况、渗透率15%，预计新增收入163.2亿元；
- 假设选取北美地区的36%的渗透率作为参考，预计新增收入391.68亿元。

图：特斯拉FSD自公测以来，在北美地区的渗透率



图：2023年FSD在北美的渗透率



04

特斯拉FSD产业链概况及相关标的

4.1 特斯拉FSD硬件供应链概况

4.2 车载摄像头及4D毫米波雷达相关标的

4.1 特斯拉FSD硬件供应链概况

◆ 特斯拉FSD硬件的供应链情况如下（仅列举）：

特斯拉FSD供应链					
	供应部件	供应商		供应部件	供应商
处理器	NNA (AI 加速器)	(自研)	物联网	以太网交换机	Marvell
	CPU	ARM (外购IP)		以太网物理层收发器	Marvell
	GPU	ARM (外购IP)			
	FSD代工	三星电子			
存储	SRAM	三星、美光	摄像头	图像传感器	安森美 (FSD HW 3.0)
	UFS	三星、东芝			索尼 (FSD HW 4.0)
定位	GPS定位模块	U-BLOS		摄像头模组	三星电机、LG Innotek
电源管理	开关电源稳压器	Maxim		车载镜头	联创电子、亚洲光学、大立光、宇瞳光学
	电源管理芯片	三星、启方半导体			
音频、数据传输	解串器	TI		毫米波雷达	高精度4D毫米波雷达

4.2 车载摄像头及4D毫米波雷达相关标的

其中，特斯拉车载镜头供应商包括联创电子、亚洲光学、大立光等；车载摄像头模组主要为LG、三星电机等。最新的特斯拉HW4.0摄像头主要由三星电机（供应比例80%）、LG Innotek（供应比例20%）代工制造，HW4.0摄像头已升级为500万像素级，国内目前已具备500万像素级或以上车载摄像头生产能力的A股上市公司主要包括（仅列举）：

车载摄像头		
	是否已供应特斯拉	简要介绍
三星电机	已供应特斯拉	供应 摄像头模组
LG Innotek	已供应特斯拉	供应 摄像头模组
联创电子 (002036.SZ)	已供应特斯拉	目前公司 车载镜头和影像模组产品 已与特斯拉形成合作。据公司2024年5月公告，现阶段已具备800万像素车载镜头量产能力。
亚洲光学 (3019.TW)	已供应特斯拉	现今特斯拉的三款型号电动车，环景、自动驾驶辅助系统等 镜头 都是亚洲光学生产。
大立光 (3008.TW)	已供应特斯拉	2023年5月，特斯拉与大力光专利纠纷达成和解；事后，大立光顺利获得特斯拉大部分车用 镜头 订单，且部分镜头产品涨价90%。
宇瞳光学 (300790.SZ)	已布局特斯拉	据2022年年报，公司积极布局车载光学业务，产品涵盖 车载镜头 、AR-HUD和车载激光雷达等，已向特斯拉供应链布局。
欧菲光 (002456.SZ)	具备8M摄像头量产能力	根据公司2023年年报，公司车载摄像头已量产产品包括2M前视三目、8M前视双目摄像头、3M和8M侧视后视摄像头、1M、2M及3M环视摄像头。
保隆科技 (603197.SH)	具备8M摄像头量产能力	据公司2023年9月消息，公司摄像头业务方面，800万像素摄像头已具备量产能力并获得项目定点。
德赛西威 (002920.SZ)	具备8M摄像头量产能力	据2021年7月新闻，公司800万像素环视摄像头已具备批量供应能力。
永新光学 (603297.SH)	具备8M摄像头研发能力	据国家知识产权局2024年1月公告，公司取得一项“一种超高清车载光学成像镜头”发明专利；该光学成像镜头像素达八百万级。

4.2 车载摄像头及4D毫米波雷达相关标的

特斯拉在HW4.0硬件配置当中，新配高精度4D毫米波雷达；据特斯拉备案文件显示，系来自Arbe的Phoenix雷达。目前，国内目前已具备4D毫米波雷达生产能力的A股上市公司主要包括（仅列举）：

4D毫米波雷达		
	是否已供应 特斯拉	简要介绍
威孚高科 (000581.SZ)	与特斯拉供应商Arbe长期合作	公司已布局4D毫米波业务，与特斯拉供应商Arbe达成合作；早在2021年11月，Arbe宣布威孚高科基于Arbe成像雷达芯片组制造的完整 雷达系统 进入测试送样阶段，并于2022年底实现量产。
华域汽车 (600741.SH)	已具备量产能力	据2023年7月公告，公司4D成像毫米波雷达产品已实现特定用户小批量供货。
欧菲光 (002456.SZ)	已具备量产能力	公司已深度布局4D毫米波业务；据2023年6月公司公告，公司4D毫米波雷达包括4D中长距雷达、4D成像舱内雷达、4D数字成像雷达等产品。
德赛西威 (002920.SZ)	技术布局	根据公司2023年7月公告，公司4D及国产化雷达方案已完成产业技术布局。
保隆科技 (603197.SH)	试产阶段	据2024年1月公告，公司4D毫米波雷达目前处于C样（批量样件）阶段，正在向客户推广。
硕贝德 (300322.SZ)	具备天线的 量产能力	据2023年8月公告，公司研发的“5G/V2X/高精度定位”多合一天线以及4D毫米波汽车雷达波导天线处于业内领先地位。

5. 风险提示

- ◆ 智驾行业发展不达预期；
 - 未来若宏观经济持续下行，下游市场需求或出现萎缩等不利因素。
- ◆ 核心零部件价格波动；
 - 核心零部件价格受市场供求关系影响较大。
- ◆ 技术迭代及产品研发滞后；
 - 市场竞争加剧，若公司技术迭代及产品研发滞后，不能紧跟市场需求的变化，则会对公司生产经营构成不利影响。
- ◆ 上市公司业绩不达预期风险；
 - 上市公司业绩作为影响股价表现的重要因素之一，可能存在因上市公司业绩不达市场预期带来的波动风险。
- ◆ 政策风险；
 - 新股发行交易政策的变化、及行业政策预期变化，可能导致分析预测出现偏差风险。
- ◆ 数据信息统计及模型测算偏差风险；
 - 数据信息统计可能存在偏差或统计不完全等，并导致分析预测出现偏差风险。
- ◆ 过去经验不代表未来；
 - 文中有通过实证来指出未来的关注方向，但存在历史不能复制及过去经验不代表未来风险。
- ◆ 系统性风险等；
 - 系统性风险及其他风险等。

分析师声明

李蕙声明，本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，勤勉尽责、诚实守信。本人对本报告的内容和观点负责，保证信息来源合法合规、研究方法专业审慎、研究观点独立公正、分析结论具有合理依据，特此声明。

本公司具备证券投资咨询业务资格的说明

华金证券股份有限公司（以下简称“本公司”）经中国证券监督管理委员会核准，取得证券投资咨询业务许可。本公司及其投资咨询人员可以为证券投资人或客户提供证券投资分析、预测或者建议等直接或间接的有偿咨询服务。发布证券研究报告，是证券投资咨询业务的一种基本形式，本公司可以对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析，形成证券估值、投资评级等投资分析意见，制作证券研究报告，并向本公司的客户发布。

免责声明：

本报告仅供华金证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因为任何机构或个人接收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本报告基于已公开的资料或信息撰写，但本公司不保证该等信息及资料的完整性、准确性。本报告所载的信息、资料、建议及推测仅反映本公司于本报告发布当日的判断，本报告中的证券或投资标的价格、价值及投资带来的收入可能会波动。在不同时期，本公司可能撰写并发布与本报告所载资料、建议及推测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息及资料保持在最新状态，本公司将随时补充、更新和修订有关信息及资料，但不保证及时公开发布。同时，本公司有权对本报告所含信息在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。任何有关本报告的摘要或节选都不代表本报告正式完整的观点，一切须以本公司向客户发布的本报告完整版本为准。

在法律许可的情况下，本公司及所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务，提请客户充分注意。客户不应将本报告为作出其投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代客户自身的投资判断与决策。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议，无论是否已经明示或暗示，本报告不能作为道义的、责任的和法律的依据或者凭证。

在任何情况下，本公司亦不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

本报告版权仅为本公司所有，未经事先书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表、转发、篡改或引用本报告的任何部分。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并注明出处为“华金证券股份有限公司研究所”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

华金证券股份有限公司对本声明条款具有惟一修改权和最终解释权。

风险提示:

报告中的内容和意见仅供参考，并不构成对所述证券买卖的出价或询价。投资者对其投资行为负完全责任，我公司及其雇员对使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失概不负责。

华金证券股份有限公司

办公地址:

上海市浦东新区杨高南路759号陆家嘴世纪金融广场30层

北京市朝阳区建国路108号横琴人寿大厦17层

深圳市福田区益田路6001号太平金融大厦10楼05单元

电话: 021-20655588

网址: www.huajinsec.com