

整车产线的 4D 毫米波雷达 高效标定工艺研究

尹兴科 朱陈伟 李明明

安徽江淮汽车集团股份有限公司

摘要: 作为自动驾驶和高级驾驶辅助系统 (ADAS) 中的关键感知设备, 毫米波雷达在辅助驾驶系统中得到了广泛应用。本文详细探讨了 4D 毫米波雷达传感器在生产线上的高效标定方法, 该方法可确保其外部参数的高精度和可靠性, 为智能驾驶的安全性和稳定性提供了强有力的技术支持。

关键词: 4D 毫米波雷达; EOL 标定; 产线标定; 标定工艺

0 前言

随着人工智能和自动驾驶技术的迅猛发展, 智能驾驶汽车逐渐成为交通运输领域的研究焦点。借助先进的传感器、控制器和执行器等装置, 实现对周围环境的感知、决策和控制, 从而提高智能驾驶安全性和交通效率。在自动驾驶及 ADAS 功能中, 毫米波雷达作为常用的感知层硬件, 能显著降低行车事故的发生率。然而, 雷达在安装过程中必然会有一定的误差, 为了不影响目标检测的准确性, 在安装雷达后必须对雷达进行标定, 以消除安装及支架规格带来的误差。为此, 本文详细介绍了一种车载 4D 毫米波雷达产线高效标定的工艺。

1 EOL 标定

1.1 定义

EOL 标定是整车下线前的一次校准, 其核心是通过雷达参考点与靶标参考点 (面) 之间的空间位置关系来确定安装角度的偏差。实现方式是通过标定间对毫米波雷达静态测角。

1.2 坐标系

标定间的坐标系以车辆前轴中心的地面投影点为原点, 遵循右手坐标系规则。 X 轴沿车辆行驶方向, Y 轴垂直于行驶方向且平行于地面, Z 轴则垂直向上。标定间靶标位置和设备的坐标均基于此坐标系, 如图 1 所示。

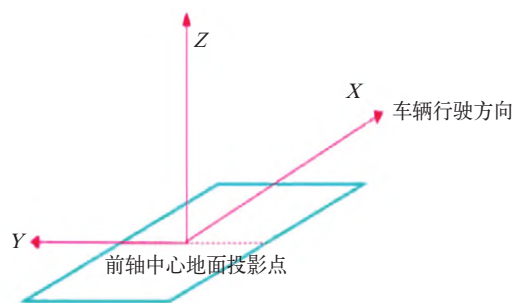


图 1 标定间坐标系

1.3 标定方案

在标定开始前, 雷达已按照标准工艺预安装在车身上, 且保险杠已经安装完毕。标定场内的角反器两侧包裹角锥型吸波材料, 吸波材料墙大小可根据生产线实际工位情况调整, 吸波材料阻隔工位其他强反射目标对标定结果的影响, 故吸波材料铺设按照实际工况进行。角反器安装在垂直滑杆上, 可根据不同车辆调整高度和水平位置。车辆进入标定场后, 通过汽车摆正器调整车辆停放位置, 使车辆纵向中心线与检测线的中心线重合。将车辆移入标定场指定位置, 对车辆进行四轮定位, 起动汽车摆正器工作, 确保每辆车位置与预设位置一致, 如图 2 所示。

2 场地要求

2.1 靶标要求

前向毫米波雷达靶标通常使用金属平板, 其平面作为参考基准。具体要求如下。

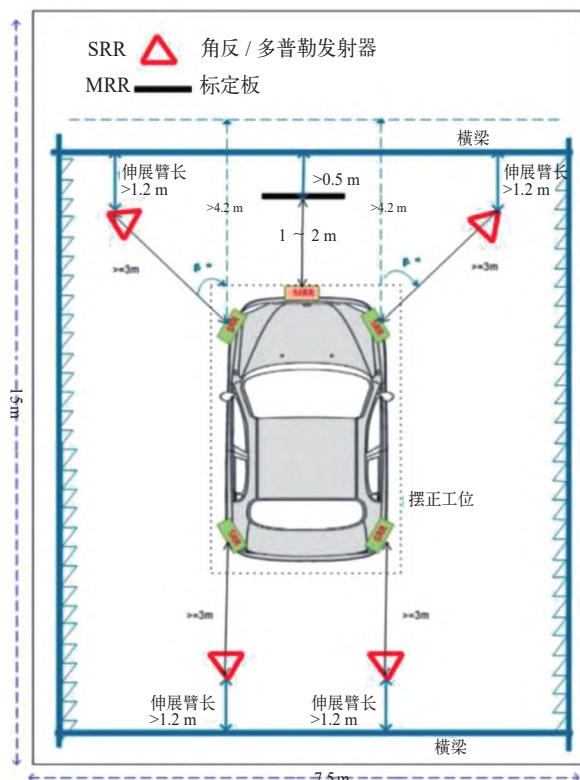


图2 4D毫米波雷达场地标定方案

- (1) 金属标定板: 平坦度 $<0.1\text{ mm}$, 表面粗糙度 $<1.6\text{ }\mu\text{m}$ 。
- (2) 标靶中心与雷达中心在Z轴方向对齐, 并且标靶底边离地高度 $\geq 3\text{ cm}$ (优先保证)。
- (3) 标靶中心与雷达中心在Y轴方向对齐
- (4) 标靶与雷达之间距离 b 为 $1\sim 2\text{ m}$ 。
- (5) 标靶背后的净空间距离 c 为 $\geq 1.2\text{ m}$ 。
- (6) RCS: 典型值 0 dBsm (以实测为准), 误差 $< 1\text{ dBsm}$ 。
- (7) 位置精度 (重复定位精度): X 为 $\pm 2\text{ mm}$, Y 为 $\pm 2\text{ mm}$, Z 为 $\pm 2\text{ mm}$ 。
- (8) 标定板大小: 典型值长/高 $= 1\text{ m} \times 0.65\text{ m}$ @ $D_{\text{mrr}} = 2\text{ m}$, 误差 $< 10\text{ mm}$; D_{mrr} 变化时见表1线性插值计算。

角雷达靶标通常采用角反射器, 具体要求如下。

表1 线性插值计算

标定距离 D_{mrr}	1 m	1.5 m	2 m
标定板宽 W	0.7 m	0.85 m	1.0 m
标定板高 H	0.45 m	0.55 m	0.65 m

- (1) 金属角反: 锥点尽可能尖锐。
- (2) RCS: $10\text{ dBsm} \pm 1\text{ dBsm}$ 。
- (3) 位置精度 (重复定位精度): Y 为 $\pm 0.5\text{ mm}$,

Z 为 $\pm 1\text{ mm}$ (X 向固定) ($D_{\text{sr}} = 3\text{ m}$) 或角反位置的不确定性造成角雷达标定Yaw向 $\pm 0.01^\circ$ 误差。

- (4) 角反大小: 角反口边长 110 mm , 棱长 78 mm 。

2.2 吸波屏风或墙要求

为了确保标定过程中不受其他物体的干扰, 必须选择合适规格的吸波材料。建议采用EMERSON & CUMING生产的吸波材料。

- (1) 吸波材料: 入射/反射损耗 $> 50\text{ dB}$, 适用于 $76\sim 77\text{ GHz}$ 频段。

- (2) 吸波材料墙/屏风的高度:

$$h \geq l \times \tan 25^\circ + h_{\text{MRR}} \quad (1)$$

式中, l 是雷达参考点距离金属结构的距离; h_{MRR} 是雷达参考点离地高度。

2.3 车辆及机械要求

产线EOL标定通过已知的车辆与标定物之间的相对位置关系, 计算出传感器在车辆上的实际安装位置和角度。因此, 对车辆定位(对中)精度有严格要求, 在 X 、 Y 、 Z 三个方向定位精度为 $\pm 2\text{ mm}$,

对准精度 $\leq \pm 0.1^\circ$, 定位(对中)时间 $\leq 2\text{ s}$ 。

在执行静态标定程序期间, 车辆符合以下条件。

- (1) 已经做好四轮定位。
- (2) 校准时, 车辆制动并空载, 稳定停在工位上。
- (3) 仅乘驾驶员1人。
- (4) 车辆胎压正常。
- (5) 校准前后车辆重心不允许有过大变动。
- (6) 运动机械部件运动到位后才能开启相应标定。

①摆正器夹持车辆稳定后, 才能进行后续相应传感器标定; ②标定角反移动到设计位置时, 才能进行相应传感器标定。

2.4 标定场地对正要求

对中系统通过推动轮胎以保证车辆同步对正。此时, 车辆被视为刚体整体移动。车辆前轴中心与后轴中心连线偏离大地坐标系下理想对中线Yaw角误差 $\leq \pm 0.03^\circ$, Pitch角误差 $\leq \pm 0.03^\circ$ 。

2.5 标定精度

雷达在水平方位上的标定精度典型值为 $\pm 0.1^\circ$, 最大值 $\pm 0.2^\circ$ 。在俯仰方位上的标定精度典型值为 $\pm 0.2^\circ$, 最大值 $\pm 0.4^\circ$ 。

在雷达校准之前, 反射板的法线与车辆行驶轴线(由非转向轮的前束角决定, 和转向轮无关)的偏差值须保证在 $\pm 0.15^\circ$ 范围内, 包含水平方向及垂直方向, 如图5所示。

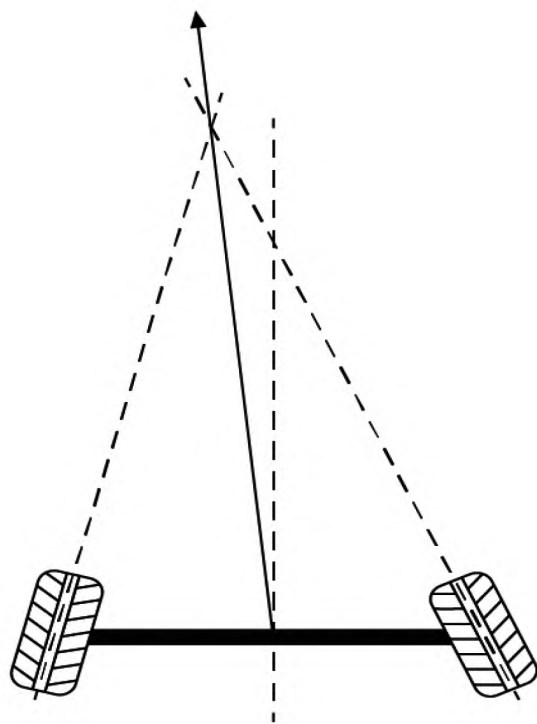


图5 行驶轴线

3 标定流程

通过工控机给雷达发送标定指令，雷达进入自动标定模式，标定完毕返回标定状态，整个标定过程小于5 s，若雷达标定成功，则将车辆移出标定场，下一辆车进入标定位置。若雷达标定失败或超时，则返回标定失败或标定超时字样，由人工进行干预调整并检查原因。如图6所示。

上位机显示标定结果：①标定成功；②标定失败，原因为无法检测到目标；③标定失败，原因为安装偏差大于可标定值或者角反器未移动到位；④标定失败，原因为通信异常。

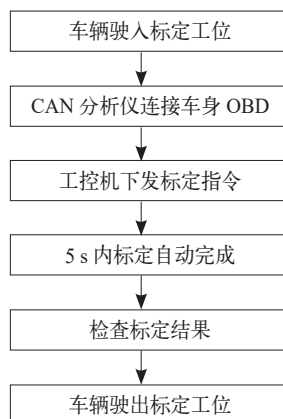


图6 标定顺序

4 结语

本文详细介绍了4D毫米波雷达在生产线上的标定间设计、布置要求、标定流程以及故障排查方法，旨在为提高4D毫米波雷达的生产效率和产品质量提供一套系统化的解决方案。通过对标定间的精心设计与优化布置，确保了标定环境的一致性和稳定性，为雷达性能的精准评估奠定坚实的基础。标定流程的细化与标准化不仅提升了工作效率，还有效降低了人为误差，使得每一台出厂的4D毫米波雷达都能达到高性能的要求。

参考文献

- [1] 苒乐,王爱春,黄少堂,等.一种车载前向毫米波雷达下线校准方法[J].汽车电器,2021,(5):4-6. DOI:10.13273/j.cnki.qcdq.2021.05.005.
- [2] 周珍林,苏鹏,刘卫洋,等.高集成、高柔性新能源汽车智驾产线标定工艺开发[J].汽车制造业,2024,(4): 47-49.
- [3] 王艺帆.自动驾驶汽车感知系统关键技术综述[J].汽车电器,2016(12):12-16.
- [4] XIANG G, MUHAMMAD S, XIAOXIAO C, et al. Towards Converged Millimeter-Wave/Terahertz Wireless Communication and Radar Sensing[J]. ZTE Communications, 2020, 18 (1): 73-82.
- [5] 朱龙.前向毫米波雷达系统自动校准功能[J].汽车电器,2021,(4): 37-40. DOI:10.13273/j.cnki.qcdq.2021.04.018.
- [6] 翟霄.TI毫米波MIMO雷达的高分辨测角算法研究[D].烟台:烟台大学,2023. DOI:10.27437/d.cnki.gytd.2023.000361.
- [7] XIAO G, ZHANG H, LUO Y, et al. Data-driven optimal tracking control for a class of affine non-linear continuous-time systems with completely unknown dynamics[J]. Iet Control Theory & Applications, 2016, 10(6):700-710.
- [8] MA T, CHEN Z, WU J, et al. A 77 GHz FMCW MIMO radar system based on 65nm CMOS cascaded 2T3R transceiver[J].Science China(Information Sciences), 2021, 64 (1): 239-241.