

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

车载激光雷达性能要求及试验方法

Automotive lidar performance requirements and test methods

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(征求意见稿)

(本草案完成时间: 2024 年 1 月 22 日)

在提交反馈意见时, 请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 符号和缩略语	6
5 性能要求	7
5.1 点云性能要求	7
5.1.1 测距能力	7
5.1.2 距离精度和距离准度	7
5.1.3 角度精度和角度准度	7
5.1.4 视场角	8
5.1.5 角度分辨率	8
5.1.6 反射特性	8
5.1.7 高反鬼像	8
5.1.8 雷达间抗干扰	8
5.1.9 拖点	8
5.1.10 启动时间	8
5.1.11 漏检角	8
5.1.12 点频和帧频	8
5.2 激光安全要求	8
5.3 环境评价要求	8
5.3.1 功能状态要求	8
5.3.2 电气性能	9
5.3.3 机械性能	10
5.3.4 防尘防水性能	11
5.3.5 环境耐候性	11
5.3.6 电磁兼容性能	12
5.3.7 耐久性	13
5.3.8 视窗遮挡	13
5.4 场景试验	13
6 试验方法	14
6.1 试验条件	14
6.1.1 试验环境条件	14
6.1.2 试验电压条件	14
6.1.3 激光雷达工作模式	14
6.1.4 环境评价试验布置	14
6.2 点云性能试验	15
6.2.1 试验通用要求	15

6.2.2	测距能力试验	15
6.2.3	距离精度和距离准度试验	17
6.2.4	角度精度和角度准度试验	19
6.2.5	视场角试验	22
6.2.6	角度分辨率试验	23
6.2.7	反射特性试验	23
6.2.8	高反鬼像试验	23
6.2.9	雷达间抗干扰试验	24
6.2.10	拖点试验	24
6.2.11	启动时间试验	25
6.2.12	漏检角试验	25
6.2.13	点频和帧频试验	26
6.3	环境评价试验	26
6.3.1	功能状态试验	26
6.3.2	电气性能试验	27
6.3.3	机械性能试验	30
6.3.4	防尘防水试验	31
6.3.5	环境耐候性试验	31
6.3.6	电磁兼容性试验	33
6.3.7	耐久性试验	34
6.3.8	视窗遮挡试验	34
7	检验规则	35
7.1	型式检验	35
7.2	抽样和分组	35
7.3	合格判定	35
附录 A	(资料性) 视场区域划分方法	36
附录 B	(资料性) 激光雷达场景试验方法	38
附录 C	(规范性) 漫反射板要求	39
附录 D	(资料性) 角度分辨率试验方法	40
附录 E	(资料性) 暗室布置要求	41
E.1	暗室尺寸	41
E.2	暗室表面材料	41
附录 F	(资料性) 耐久性试验计算模型	42
F.1	产品在汽车上安装位置的典型温度模型	42
F.2	高温耐久性试验 Arrhenius 计算模型	42
F.3	温度交变耐久性试验 Coffin-Manson 计算模型	43
F.4	高温高湿耐久试验 Lawson 计算模型	44

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由工业和信息化部提出。

本文件由全国汽车标准化技术委员会（SAC/TC114）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

车载激光雷达性能要求及试验方法

1 范围

本文件规定了车载激光雷达（以下简称激光雷达）的性能要求和试验方法。

本文件适用安装在道路车辆，用于车辆外部信息感知的激光雷达，其它激光雷达可参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限(AQL)检索的逐批检验抽样计划

GB/T 16422.2—2022 塑料 实验室光源暴露试验方法 第2部分：氙弧灯

GB/T 18833 道路交通反光膜

GB/T 19951—2019 道路车辆 电气/电子部件对静电放电抗扰性的试验方法

GB/T 21437.2—2021 道路车辆 电气/电子部件对传导和耦合引起的电骚扰试验方法 第2部分：沿电源线的电瞬态传导发射和抗扰性

GB/T 21437.3—2021 道路车辆 电气/电子部件对传导和耦合引起的电骚扰试验方法 第3部分：对耦合到非电源线电瞬态的抗扰性

GB/T 28046.2—2019 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第2部分：电气负荷

GB/T 28046.3—2011 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第3部分：机械负荷

GB/T 28046.4—2011 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第4部分：气候负荷

GB/T 28046.5—2013 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第5部分：化学负荷

GB/T 30038—2013 道路车辆 电气电子设备防护等级（IP代码）

GB 34660—2017 道路车辆 电磁兼容性要求和试验方法

ISO 20567-1:2017 涂料和清漆 涂层耐石头碎片划伤的测定 第1部分：多冲击试验（Paints and varnishes — Determination of stone-chip resistance of coatings — Part 1: Multi-impact testing）

IEC 60825-1 激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求（Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements）

JJF 1601 漫反射测量光谱仪校准规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

激光雷达 light detection and ranging ; lidar

发射激光束并接收回波以感知周围环境信息的装置。

3.2

点云 point cloud

激光雷达输出的对三维空间感知的点的集合。

3.3

有效点 valid point

激光雷达形成的点云中，对应现实空间位置存在真实物体且满足测距精度和准度要求的点。

3.4

虚点 false positive

激光雷达形成的点云中，对应位置不存在实际物体的点。

3.5

虚点率 false positive ratio

虚点数与理论探测点数量的比率。

3.6

探测概率 probability of detection ; PoD

激光雷达测量形成有效点的概率。

注：车载激光雷达的探测概率用点云中有效点数量与理论探测点数量的比率来计算。

3.7

点频 point frequency

激光雷达单位时间内输出的点云点数。

3.8

帧 frame

激光雷达在标称视场角内的单次完整扫描形成的点云数据。

3.9

帧频 frame frequency

激光雷达单位时间内输出的帧数。

3.10

精密度 precision**精度**

在一定测量条件下，对某一量的多次测量中，各测量值间的离散程度。

[来源：GB/T 14911-2008，4.20]

3.11

准确度 accuracy**准度**

在一定测量条件下，对某一量的多次测量中，测量值的估值与其真值的偏离程度。

[来源：GB/T 14911-2008，4.21]

3.12

反射率 reflectivity

材料层的厚度使得其反射比不再随厚度的增加而变化时的反射比。

[来源：GB/T 2900.65—2004，845-04-86]

注：在本文件中用于描述漫反射板表面的物理特征。

3.13

测距中心 ranging center

激光雷达形成的点云所构建的虚拟三维空间的坐标原点。

3.14

视场角 field of view angle; FOV

在激光雷达形成点云中，两侧最边缘的有效点与测距中心连线在水平/垂直方向形成的最大夹角。

注：激光雷达的视场角范围可分为水平视场角范围和垂直视场角范围。

3.15

视场区域 field of view region

视场角内按一定逻辑划分的区域。

注：一定逻辑是指按照测量范围等划分方法确定的区域，附录A给出了典型的视场区域划分方法。

3.16

测距能力 range capability

激光雷达在规定的光照强度、探测概率、虚点率等条件下，对规定的激光正入射的物体进行探测的最大/最小距离。

3.17

角度分辨率 angular resolution

激光雷达形成的点云中，水平/垂直方向上相邻探测点到点云三维坐标原点之间的连线所形成夹角。

注：激光雷达的角分辨率可分为水平角度分辨率与垂直角度分辨率。

3.18

漏检角 gap

激光雷达水平或垂直方向被测物体被漏检测的角度范围。

3.19

反射特性 reflective property

通过对激光雷达反射回波的幅度或通量的测量，基于某种特定关系对探测目标表面真实反射率进行映射形成的数值。

注：特定关系一般是指基于理想漫反射体进行的映射。

3.20

抗干扰 anti-interference

激光雷达抵御或抑制对有用信号的接收造成影响的干扰的能力。

注：干扰源一般为环境中能被雷达接收的、非自身发出的光线，例如阳光、其他雷达发出激光等。

3.21

鬼像 ghost

激光雷达形成的点云中，对应的位置没有真实目标，并且在时间和空间上连续的虚点。

3.22

拖点 interstitial point

一束激光打在两个物体上引起点云中两个物体边缘之间的虚点。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用本文件。

PoD: 探测概率 (Probability of Detection)

d_{\min} : 标称测距范围最小值 (Minimum Range of Detection)

d_{\max} : 标称测距范围最大值 (Maximum Range of Detection)

T_{\max} : 最高工作温度 (Maximum Operating Temperature)

T_{\min} : 最低工作温度 (Minimum Operating Temperature)

U_{\max} : 最高供电电压 (Supply Voltage Maximum)

U_{\min} : 最低供电电压 (Supply Voltage Minimum)

U_N : 标称电压 (Nominal Voltage)

5 性能要求

5.1 点云性能要求

5.1.1 测距能力

5.1.1.1 测远能力

按照6.2.2.1进行试验, 在激光雷达各视场区域内, 探测概率大于50%的最大探测距离应满足表1的要求。

表1 测距能力、距离精度和准度指标限值

雷达类型	距离范围 (10%漫反射板) (单位: m)		距离精度 (单位: m)	距离准度 (单位: m)
	测远距离	测近距离		
短距雷达	≥ 20	≤ 0.6	$\leq \text{Max}(0.05, 0.25\%R)$	$\pm \text{Max}(0.1, 0.5\%R)$
长距雷达	中心视场 ≥ 150 边缘视场 ≥ 90	≤ 3.0	$\leq \text{Max}(0.1, 0.25\%R)$	$\pm \text{Max}(0.2, 0.5\%R)$

注: R为当前的探测距离数值。

5.1.1.2 测近能力

按照6.2.2.2进行试验, 在激光雷达各视场区域内, 探测概率大于50%的最小探测距离应满足表1的要求。

5.1.2 距离精度和距离准度

5.1.2.1 测距精度和测距准度

按照6.2.3.1进行试验, 激光雷达在标称测距范围内各视场区域的测距准度应满足表1的要求。

5.1.2.2 平面度

按照6.2.3.2进行试验, 在激光雷达各视场区域的平面度应小于1.5倍表1要求的距离精度。

5.1.3 角度精度和角度准度

按照6.2.4进行试验, 激光雷达各视场区域的角度精度和相邻视场区域的角度准度应满足表2的要求。

表2 角度精度和准度、角度分辨率和反射特性指标限值

雷达类型	角度精度(σ) (单位: °)	角度准度 (单位: °)	角度分辨率 (单位: °)	反射特性 精度
短距雷达/ 长距雷达	水平: ≤ 0.1 垂直: ≤ 0.1	水平: ± 0.1 垂直: ± 0.1	与标称分辨率的差 \leq 10%标称值	5 (10%漫反射板) 15 (50%漫反射板) 20 (90%漫反射板) 30 (GB/T 18833规定的V类反光膜)

5.1.4 视场角

根据6.2.5进行试验, 激光雷达的水平方向和垂直方向视场角分别差应不小于标称值。

5.1.5 角度分辨率

根据6.2.6进行试验, 激光雷达的角度分辨率应满足表2的要求。

5.1.6 反射特性

按照6.2.7进行试验, 激光雷达的反射特性精度应满足表2的要求。

5.1.7 高反鬼像

按照6.2.8进行试验, 激光雷达各视场区域的单帧最大虚点率不大于0.1%。

5.1.8 雷达间抗干扰

按照6.2.9进行试验, 试验中虚点率不应大于0.1%。

5.1.9 拖点

按照6.2.10进行试验, 试验中前漫反射板距离激光雷达5 m外的位置, 且当两块漫反射板之间的距离达到2 m时, 在点云中不应有拖点。

5.1.10 启动时间

按照6.2.11进行试验, 激光雷达启动时间应不大于40 s。

5.1.11 漏检角

按照6.2.12进行试验, 在激光雷达视场区域内, 激光雷达的漏检角应小于宣称的角度分辨率。

注: 非重复性扫描雷达指标由供需双方商定。

5.1.12 点频和帧频

按照6.2.13进行试验, 试验中点频不低于99.9%的标称值, 帧频不低于99.9%的标称值。

5.2 激光安全要求

激光雷达应满足IEC 60825-1定义的1类激光产品的要求。

5.3 环境评价要求

5.3.1 功能状态要求

5.3.1.1 试验中功能要求

按照6.3.1.1和6.3.1.2进行试验，激光雷达在漫反射板上有效点云的相对丢点率应不超过20%，丢包率应不超过5%。

5.3.1.2 试验后功能要求

按照6.3.1.3和6.3.1.4进行试验，激光雷达测距精度和准度应满足表1要求，点频和帧频应满足5.1.11的要求。

5.3.2 电气性能

5.3.2.1 直流供电电压

按照6.3.2.1进行试验，产品的直流供电电压范围见表3，在 $U_{Smin} \sim U_{Smax}$ 范围内，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

表3 直流供电电压范围

标称电压 (U_N)	直流供电电压	
	U_{Smin}	U_{Smax}
12 V	9 V	16 V
24 V	16 V	32 V

注：标称电压不在本表范围内的产品，其供电电压范围和试验方法由供需双方协商确定

5.3.2.2 过电压

5.3.2.2.1 ($T_{max}-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 条件

按照6.3.2.2.1进行试验，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.2.2 室温条件下

对于标称电压为12V的激光雷达，按照6.3.2.2.2进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.3 叠加交流电压

按照6.3.2.3进行试验，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.4 供电电压缓降和缓升

按照6.3.2.4进行试验，试验中当电压在 $U_{Smin} \sim U_N$ 范围内时和试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.5 供电低压缓降和快升

按照6.3.2.5进行试验，试验中当电压在 $U_{Smin} \sim U_N$ 范围内时和试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.6 供电电压瞬态变化

5.3.2.6.1 电压瞬时下降

按照6.3.2.6.1进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.6.2 对电压骤降的复位性能

按照6.3.2.6.2进行试验，试验中当电压在 U_{\min} 时和试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.7 启动特性

按照6.3.2.7进行试验，试验中当电压在 U_{\min} 时和试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.8 反向电压

按照6.3.2.8进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.9 抛负载

按照6.3.2.9进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.10 短时中断供电

按照6.3.2.10进行试验，试验中供电中断时间不超过100 μs 时，激光雷达应符合5.3.1的要求；试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.11 开路

5.3.2.11.1 单线开路

按照6.3.2.11.1进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.11.2 多线开路

按照6.3.2.11.2进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.12 短路保护

按照6.3.2.12进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.13 绝缘电阻

按照6.3.2.13进行试验，激光雷达的绝缘电阻应不小于10 $\text{M}\Omega$ ，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.2.14 参考接地和供电偏移

按照6.3.2.14进行试验，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.3 机械性能

5.3.3.1 机械振动

按照6.3.3.1进行试验，试验后激光雷达的外观和结构不应发生损坏，性能应符合5.3.1的要求。

5.3.3.2 机械冲击

按照6.3.3.2进行试验，试验后激光雷达的外观和结构不应发生损坏，性能应符合5.3.1的要求。

5.3.3.3 碎石冲击

按照6.3.3.3进行试验，试验后激光雷达的外观和结构不应发生损坏，视窗表面受影响面积不应超过0.2%，见ISO 20567-2017图3中a)。

5.3.3.4 视窗耐磨

按照6.3.3.4进行试验，试验后激光雷达性能应符合5.3.1的要求。

5.3.3.5 线束拉脱力

按照6.3.3.5进行试验，在试验后激光雷达不应出现损伤、线束断裂、端子脱落等现象，性能应符合5.3.1的要求。

5.3.4 防尘防水性能

按照6.3.4.1进行防尘试验，按照6.3.4.2进行防水试验，激光雷达的外壳防尘防水等级应根据安装在汽车上不同的位置来确定，防尘防水等级见表4。试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

表4 分区域防护等级

安装位置	汽车厢体外部	汽车厢体内部
防护等级	IP6K7/IPX9K	IP6K7
注：IPX9K仅适用于产品装车后的外露面		

5.3.5 环境耐候性

5.3.5.1 温湿度范围

激光雷达的贮存环境温湿度范围和工作环境温湿度范围应符合表5的规定。

表5 温湿度范围

汽车上安装位置	贮存环境温度 ℃	工作环境温度 ($T_{min} \sim T_{max}$) ℃	工作环境相对湿度 %RH
乘客舱内太阳直射处	-40~95	-40~90	25~75
无特殊要求	-40~90	-40~85	25~75

5.3.5.2 低温试验

5.3.5.2.1 低温贮存

按照6.3.5.1.1进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.2.2 低温工作

按照6.3.5.1.2进行试验，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.3 高温试验

5.3.5.3.1 高温贮存

按照6.3.5.2.1进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.3.2 高温工作

按照6.3.5.2.2进行试验，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.4 温度梯度

按照6.3.5.3进行试验，试验中和试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.5 温度循环

5.3.5.5.1 规定变化率的温度循环

按照6.3.5.4.1进行试验，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.5.2 规定转换时间的温度快速变化

按照6.3.5.4.2进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.6 水飞溅

按照6.3.5.5进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.7 浸没

按照6.3.5.6进行试验，试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.8 盐雾渗漏和功能

按照6.3.5.7进行试验，试验后不应有盐水进入激光雷达壳体，激光雷达的表面不应有脱落、龟裂、起泡、锈蚀的现象，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.9 湿热循环

按照6.3.5.8进行试验，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.10 稳态湿热

按照6.3.5.9进行试验，试验的最后1h和试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.11 太阳光辐射

按照6.3.5.10进行试验，试验后，激光雷达的表面不应有脱落、龟裂、起泡等现象，激光雷达表面字体清晰，且激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.5.12 化学负荷

按照6.3.5.11进行试验，试验后激光雷达的表面不应有脱落、龟裂、起泡、锈蚀等现象，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.6 电磁兼容性能

5.3.6.1 对静电放电抗扰性

5.3.6.1.1 激光雷达通电

按照6.3.6.1.1进行试验，试验中和试验后激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.6.1.2 激光雷达不通电

按照6.3.6.1.2进行试验，试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.6.2 由传导和耦合引起的电骚扰

5.3.6.2.1 沿电源线的电瞬态传导

按照6.3.6.2.1进行试验，抗扰试验等级和试验后激光雷达功能状态等级应符合表6的要求。

表6 沿电源线瞬态传导的抗扰性能

试验脉冲	抗扰试验等级	试验要求
1	III	试验后激光雷达应符合 5.3.1 的要求
2a	III	试验中和试验后激光雷达应符合 5.3.1 的要求
2b	III	试验后激光雷达应符合 5.3.1 的要求
3a/3b	III	试验中和试验后激光雷达应符合 5.3.1 的要求
注：抗扰试验等级定义见GB/T 21437.2—2021的附录A。		

5.3.6.2.2 除电源线外的导线通过容性和感性耦合的电瞬态发射

按照6.3.6.2.2进行试验，试验中和试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.6.3 对电磁辐射的抗扰性

按照6.3.6.3进行试验，试验中和试验后，激光雷达应符合5.3.1的要求。

5.3.6.4 无线电骚扰特性

5.3.6.4.1 传导发射

按照6.3.6.4.1进行试验，激光雷达应符合GB/T 18655—2018中表5和表6的要求。

5.3.6.4.2 辐射发射

按照6.3.6.4.2进行试验，激光雷达应符合GB/T 18655—2018中表7等级3的要求。

5.3.7 耐久性

按照6.3.7.1、6.3.7.2和6.3.7.3进行试验，激光雷达在试验周期的25%、50%、75%和试验后应符合5.3.1的要求。

5.3.8 视窗遮挡

按照6.3.8进行试验，激光雷达视窗前有遮挡物时，激光雷达应发出报警信息，将遮挡物移除后，激光雷达不应再发出报警信息。

5.4 场景试验

参考附录B进行场景试验，试验结果要求由供需双方协商确定。

6 试验方法

6.1 试验条件

6.1.1 试验环境条件

如无其他规定，试验环境条件应符合表7的规定。

表7 试验环境条件

温度 ℃	相对湿度 %	气压 Pa
23±5	25~75	(86~106) × 10 ³

6.1.2 试验电压条件

如无其他规定，试验电压条件应符合表8的规定。

表8 试验电压条件

单位为伏特

试验电压	U _N =12 V电系	U _N =24 V电系
U _A	14±0.2	28±0.2
U _B	12±0.2	24±0.2

6.1.3 激光雷达工作模式

6.1.3.1 工作模式 1

不向激光雷达供电。

工作模式1.1：激光雷达未连接到线束。

工作模式1.2：激光雷达模拟在车辆上的安装位置，连接到线束。

6.1.3.2 工作模式 2

所有电气连接完好，激光雷达以电压U_B带电运行。

工作模式2.1：激光雷达功能不被激活（如休眠模式）。

工作模式2.2：激光雷达带电运行并控制在典型运行模式。

6.1.3.3 工作模式 3

所有电气连接完好，激光雷达以电压U_A带电运行。

工作模式3.1：激光雷达功能不被激活。

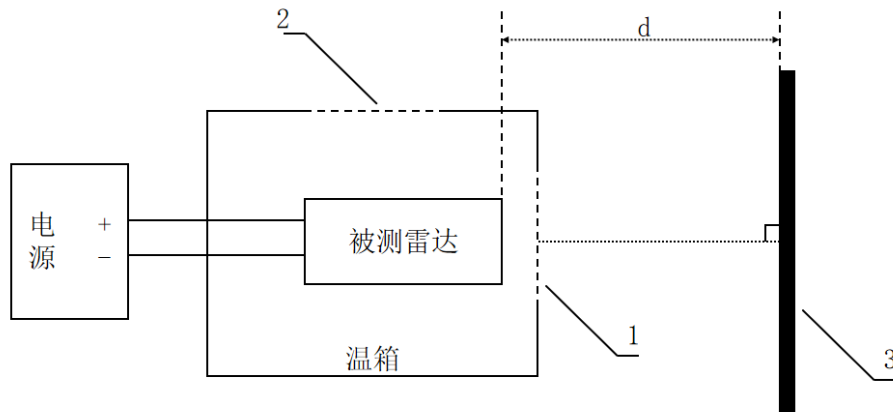
工作模式3.2：激光雷达带电运行并控制在典型运行模式。

电气负荷试验施加的电压在各试验中单独规定。

6.1.4 环境评价试验布置

进行6.3环境评价试验时，按照图1的方法布置试验环境，使用满足附录C要求的10%反射率的漫反射板，将激光雷达中心视场区域对准目标反射板中心，漫反射板与激光雷达之间的距离不小于2m。试验环境应尽量避免同波段光源干扰。

试验项目为环境耐候性时透光温箱透光窗口的透光率不应低于90%（905-1550nm波段）。



标引序号说明：

1——透光窗口；

2——观测窗口；

3——10%反射率漫反射板；

d——漫反射板与激光雷达之间的距离。

图1 透光温箱示意图

6.2 点云性能试验

6.2.1 试验通用要求

具备策略性加密功能（ROI）的激光雷达对该功能开启和关闭两种状态应分别进行点云性能试验。

6.2.2 测距能力试验

6.2.2.1 测远能力试验

参考附录A对激光雷达的视场区域进行划分。参考图2所示布置测试设备，使用满足附录C要求的10%反射率的漫反射板。在符合表9的试验条件下，激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下。

- 在高精度转台上安装激光雷达。
- 在距激光雷达水平距离 $0.95d_{Nmin} + 5\text{ cm}$ 处垂直放置漫反射板，漫反射板尺寸宜大于 $2.4\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 。
- 绕测距中心旋转激光雷达，使激光雷达任意一个视场区域的中心与漫反射板的中心点重合，记录一段连续时间内不少于100帧点云。
- 计算该时段内漫反射板上的理论点总数，统计视场区域内满足图3要求的点作为有效点总数，且有效点总数量宜大于200个。单帧可以只包含1个或多个理论点，当单帧理论点为1时，有效理论点数等于理论帧数。
- 按照式(1)计算雷达该视场区域的PoD。

$$PoD = \frac{n_e}{n_r} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：

n_r ——视场区域内落在漫反射板上的理论点总数；

n_e ——视场区域内落在漫反射板上的有效点总数。

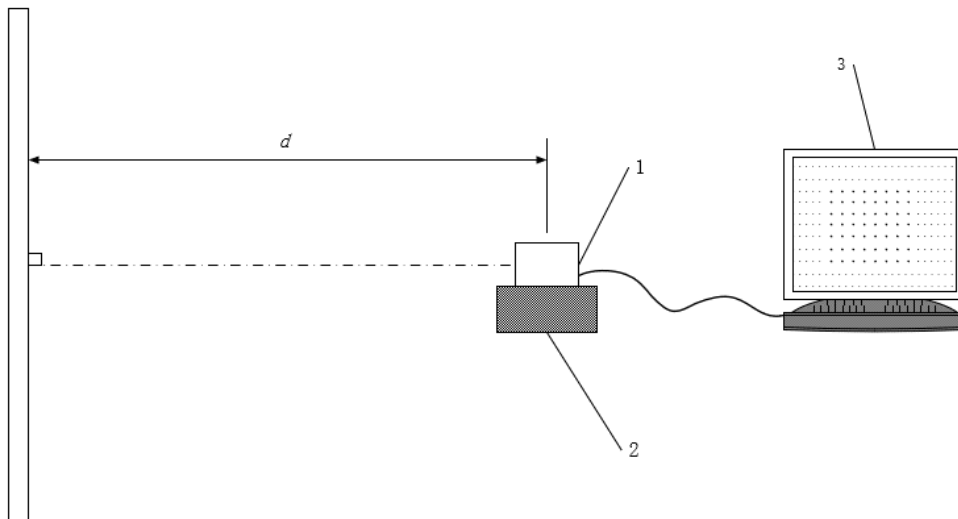
注：选取落在漫反射板上光斑完整的点进行计算。

- f) 激光雷达与漫反射板距离每次增加/缩小 1 m，重复步骤 c)~e)，直至得到满足探测概率大于 50%的最大距离。
- g) 重复步骤 b)~f)，依次测试激光雷达其它视场区域满足探测概率大于 50%的最大距离。

表9 测远能力试验环境条件

温度	相对湿度	光照强度	能见度	气压
(-20~40) °C	(25~75) %	(75~100) × 10 ³ Lux	≥20 km	(86~106) × 10 ³ Pa

注：环境的光照强度应使用照度计测量漫反射板反射面的正入射太阳光照强度。



标引序号说明：

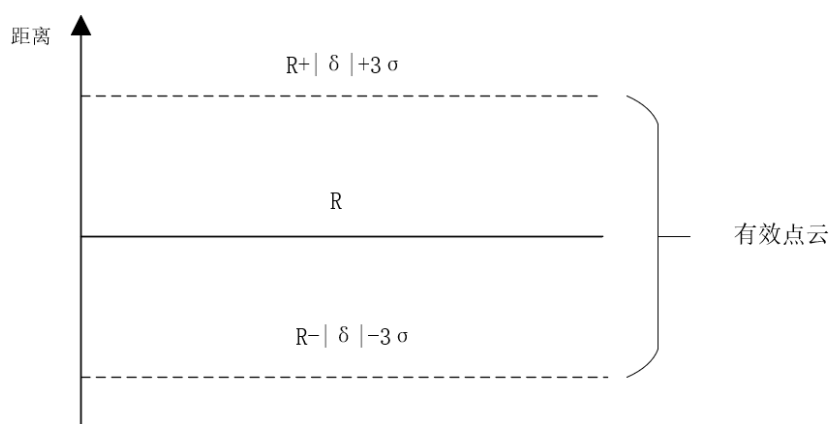
1——激光雷达；

2——高精度换台；

3——点云可视化设备；

d——激光雷达与漫反射板之间的垂直距离。

图2 激光雷达测远及测近试验布置



标引序号说明:

R ——当前探测距离;

δ ——当前探测距离要求满足的准度;

σ ——当前探测距离要求满足的精度。

图3 有效点云筛选

6.2.2.2 测近能力试验

参考附录A对激光雷达的视场区域进行划分。参考图2所示布置测试设备,使用满足附录C要求的10%反射率的漫反射板,激光雷达以工作模式2.2进行试验,试验步骤如下。

- 在高精度转台上安装激光雷达。
- 在距激光雷达水平距离 $d_{Nmin} +5 \text{ cm}$ 处竖直放置漫反射板,漫反射板尺寸宜为1 m×1 m。
- 绕测距中心旋转激光雷达,使激光雷达任意一个视场区域的中心与漫反射板的中心点重合,记录一段连续时间内不少于100帧点云。
- 计算该时段内漫反射板的中心±5个分辨率(标称)区域内的理论点数,统计该区域该时段内满足图3要求的点作为有效点总数,且有效点总数量宜大于200个。
- 按式(1)计算雷达该视场区域的PoD。
- 激光雷达与漫反射板距离每次增加/缩小0.1 m,重复步骤b)~e),直至得到满足探测概率大于50%的最小距离。
- 重复步骤b)~f),依次测试激光雷达其它视场区域满足探测概率大于50%的最小距离。

注:在统计点时,距离显示为零的点不作为有效点。

6.2.3 距离精度和距离准度试验

6.2.3.1 测距精度和测距准度试验

参考附录A对激光雷达的视场区域进行划分。参考图2所示布置试验设备,使用满足附录C要求的10%反射率的漫反射板。在满足表9的试验条件下,激光雷达以工作模式2.2进行试验,试验步骤如下。

- 在高精度转台上安装激光雷达。
- 在距激光雷达水平距离 $d_{Nmin} +5 \text{ cm}$ 处竖直放置漫反射板,漫反射板尺寸宜大于2.4 m×2.4 m。
- 绕测距中心旋转激光雷达,使激光雷达任意一个视场区域的中心与漫反射板的中心点重合,

- 记录一段连续时间内不少于 100 帧点云。
- d) 选取记录的点云中漫反射板中心±1 分辨率范围内的有效点，点的光斑应完全照射在漫反射板上，数量宜大于 200 个。将每个有效点的测距值换算为激光雷达测距中心到漫反射板的垂直距离 d_1, d_2, \dots, d_n 。
 - e) 按照式（2）与式（3）计算测距准度与精度。

$$\delta_d = \overline{d_n} - d \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $\overline{d_n}$ ——n个有效点换算出的激光雷达测距中心到漫反射板的垂直距离的平均值；
- d ——激光雷达测距中心至漫反射板的实际距离；
- δ_d ——测距准度。

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \overline{d_n})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- d_i ——第i个有效点换算出的激光雷达测距中心到漫反射板的垂直距离；
- n ——选取的有效点总数；
- σ_d ——测距精度。
- f) 重复步骤 c)～e)，依次测试激光雷达其它视场区域的测距精度和准度；
- g) 调整激光雷达与漫反射板之间的距离，重复步骤 b)～f)测量不同距离下激光雷达各视场区域的测距精度和准度。测试宜参照 $d_{Nmin}^{+5\text{ cm}}$ 、 $0.25d_{Nmax-5\text{ cm}}^{+5\text{ cm}}$ 、 $0.5d_{Nmax-5\text{ cm}}^{+5\text{ cm}}$ 、 $0.75d_{Nmax-5\text{ cm}}^{+5\text{ cm}}$ 和 $d_{Nmax-5\text{ cm}}^0$ 顺序设置测试距离。

6.2.3.2 平面度试验

参考图2所示布置试验设备，使用满足附录C要求的漫反射板。在满足表9的试验条件下，激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下。

- a) 安装激光雷达并放置在离地面1 m±5 cm高的位置，通电读取点云数据。
- b) 在激光雷达水平距离10 m±5 cm左右处放置尺寸为1 m×1 m且反射率为10%的漫反射板，漫反射板与激光雷达入射法线方向垂直。
- c) 通过高精度全站仪或扫描仪扫描目标板的上下左右中任选三个不在同一直线上的点计算平面方程得到真实的目标平面，利用点到平面距离计算公式计算反射板对应多帧数据的所有点到该真实平面的距离分别为 r_1, r_2, \dots, r_n ，不低于100帧的数据。
- d) 根据式（4）计算平面度。

$$P = \pm \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- P ——平面度；
- r_i ——第i个点到真实平面的距离；
- n ——选取有效点总数；

注：漫反射板边缘的拖点云不代入计算。

- e) 更换漫反射板与激光雷达距离至50 m±5 cm，重复步骤b)～d)。
- 注：如激光雷达的测远能力不足50 m，应将漫反射板与激光雷达距离设置为 d_{Nmax} 。

- f) 调整激光雷达俯仰角,使其它九宫格内的被测方向所发射的激光线束依次入射至目标板,重复步骤b)~e)。

6.2.4 角度精度和角度准度试验

6.2.4.1 试验适用性说明

6.2.4.2和6.2.4.3试验方法不适用于采用MEMS技术的激光雷达。

6.2.4.2 角度精度试验

参考附录A对激光雷达的视场区域进行划分。参考图4所示布置试验设备,使用满足附录C要求的90%反射率的漫反射板。激光雷达以工作模式2.2进行试验,试验步骤如下:

- 激光雷达安装在高精度转台。在距离激光雷达50m以上距离垂直于地面放置一块90%反射率且高平面度漫反射板(尺寸宜为2 m×1 m)。漫反射板的水平中心点与激光雷达视窗法线相交,与法线夹角10°左右,如图4中的a)所示。
注:如果激光雷达测远能力小于50 m,此试验可在 d_{Nmax} 的距离下进行。
- 通过全站仪测得漫反射板中心坐标和四个角的坐标,测得激光雷达测距中心到漫反射板中心的距离 d 。计算漫反射板与激光雷达法线夹角 β 。
- 将激光雷达的一个视场区域的中心位置对准漫反射板进行扫描,记录不少于300帧点云。
- 选取漫反射板中间位置的水平方向点云,提取这些点的上报距离以及水平上报角度(内参补偿后)。
- 按照式(5)计算每个点的角度 α_i ,分别得到 $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ 。然后按照式(6)计算每个点角度偏差 δ_i ,分别得到 $\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n$ 。

$$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{d \sin \beta}{d_i}\right) - \beta \dots \dots \dots (5)$$

式中:

α_i ——第*i*个点的角度;

d ——激光雷达测距中心到漫反射板中心的距离;

d_i ——激光雷达输出的第*i*个点的距离;

β ——漫反射板与激光雷达法线夹角。

$$\delta_i = |\alpha_i - \alpha_{zi}| \dots \dots \dots (6)$$

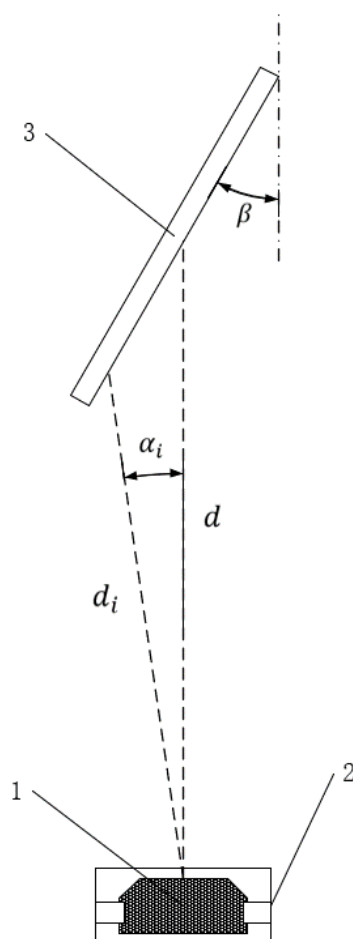
式中:

δ_i ——第*i*个点的角度偏差;

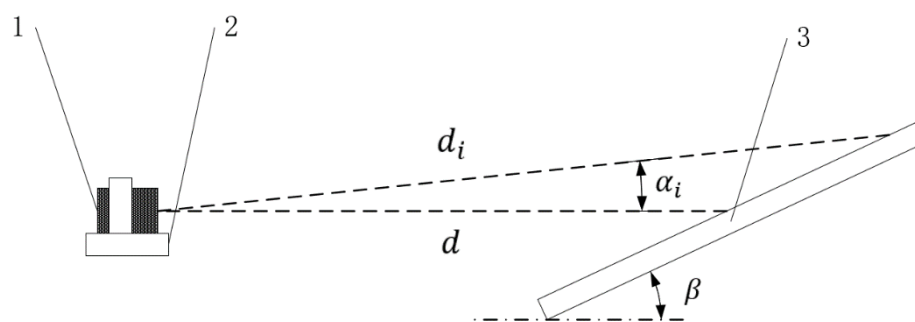
α_{zi} ——第*i*个点的上报角度。

- 将步骤c)中的数据带入步骤e)进行计算,得到每个点的水平角度偏差数据。计算这组数据的标准差即为该视场区域水平角度精度。
- 重复步骤c)~f)依次测试其他视场区域的水平角度精度。
- 如图4中的b)所示调整试验场景布置,在距离激光雷达(30~50)m距离(参考测试精度分析,按需求选取测试距离)放置一块90%反射率且高平面度漫反射板(尺寸宜为1.5 m×1.5 m以上),漫反射板支持俯仰角调节并可锁定位置。调节漫反射板位置和俯仰角,使漫反射板中心与激光雷达视窗法线相交,漫反射板表面所在平面与法线的夹角为10°。

- i) 重复步骤b)和c)后,选取漫反射板中间位置的垂直方向点云,提取这些点的上报距离以及垂直上报角度(内参补偿后)。
- j) 将步骤i)中的数据带入步骤e)进行计算,得到每个点的垂直角度偏差数据。计算这组数据的标准差即为该视场区域垂直角度精度。
- k) 重复步骤i)和j)依次测试其他视场区域的垂直角度精度。



a) 水平角度精度试验(俯视)



b) 垂直角度精度试验(侧视)

标引序号说明:

1——激光雷达;

2——高精度转台;

3——漫反射板;

α_i ——第*i*个点的角度;

d ——激光雷达测距中心到漫反射板中心的距离;

d_i ——激光雷达输出的第*i*个点的距离;

β ——漫反射板与激光雷达法线夹角。

图4 角度精度试验场景布置

6.2.4.3 角度准度试验

试验使用满足附录C要求的90%反射率材料覆盖的正三棱锥。激光雷达以工作模式2.2进行试验,试验步骤如下:

- 将激光雷达固定在高精度转台上,激光雷达原点与转台旋转中心重合,使正三棱锥的中心线通过激光雷达原点。
- 执行激光雷达扫描,覆盖正三棱锥的三个侧面,录制10帧点云数据叠加成单帧点云。将叠加后单帧点云中正三棱锥的三个侧面分别进行拟合并计算拟合出的正三棱锥的顶点坐标。平面拟合方式宜使用最小二乘法。
- 分别水平和垂直转动转台,记录转台转动角度。执行激光雷达扫描,覆盖正三棱锥的三个侧面,录制10帧点云数据叠加成单帧点云。将叠加后单帧点云中正三棱锥的三个侧面分别进行拟合并计算新拟合出的顶点坐标。
- 根据式(7)、式(8)和式(9),将转动前后激光雷达拟合出的三面角锥顶点坐标由笛卡尔坐标系(x, y, z)转换为球坐标系(r, ϑ, φ)。按照式(10)、式(11)、式(12)和式(13)计算水平角度精度和垂直角度精度。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

r ——球坐标系径向距离;

x ——笛卡尔坐标系横坐标;

y ——笛卡尔坐标系纵坐标;

z ——笛卡尔坐标系竖坐标。

$$\vartheta = \arctan \left(\frac{y}{x} \times \frac{180}{\pi} \right) \dots\dots\dots (8)$$

式中:

ϑ ——球坐标系方位角。

$$\varphi = \arctan \left(\frac{z}{r} \times \frac{180}{\pi} \right) \dots\dots\dots (9)$$

式中:

φ ——球坐标系俯仰角。

$$\theta_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1 \dots\dots\dots (10)$$

式中:

- θ_1 ——转台转动前激光雷达测得的角锥顶点的水平方位角；
 θ_2 ——转台转动后激光雷达测得的角锥顶点的水平方位角；
 θ_1 ——转台转动前后激光雷达测得的角锥顶点的水平方位角差值。

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- $\Delta\theta$ ——水平角度准度；
 θ_2 ——转台水平转动过的角度。

$$\phi_1 = \varphi_2 - \varphi_1 \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- φ_1 ——转台转动前激光雷达测得的角锥顶点的垂直方位角；
 φ_2 ——转台转动后激光雷达测得的角锥顶点的垂直方位角；
 ϕ_1 ——转台转动前后激光雷达测得的角锥顶点的垂直方位角差值。

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \dots\dots\dots (13)$$

式中：

- $\Delta\phi$ ——垂直角度准度；
 ϕ_2 ——转台垂直转动过的角度。

6.2.5 视场角试验

参考图2所示布置试验设备，使用满足附录C要求的90%反射率的漫反射板。激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下。

- 在高精度转台上安装激光雷达。
- 在距激光雷达水平距离 $10\text{ m} \pm 5\text{ cm}$ 处竖直放置漫反射板，漫反射板尺寸宜为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。
- 绕测距中心旋转激光雷达，使漫反射板全部在激光雷达的视场内。
- 以 0.01° 步进向左旋转转台，记录雷达点云中漫反射板左边缘全部消失时转台的角度，多次测量取平均值记为 θ_l 。再以 0.01° 步进向右旋转转台，记录雷达点云中漫反射板右边缘刚好全部消失时转台的角度，多次测量取平均值记为 θ_r 。
- 根据式（14）计算激光雷达水平方向视场角。

$$FOV_h = |\theta_l - \theta_r| - \beta_h \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- FOV_h ——激光雷达水平方向视场角；
 β_h ——漫反射板相对于激光雷达测距中心在水平方向的张角。

- 以 0.01° 步进向上转转台，记录雷达点云中漫反射板上边缘全部消失时转台的角度，多次测量取平均值记为 θ_t 。再以 0.01° 步进向下转转台，记录雷达点云中漫反射板下边缘刚好全部消失时转台的角度，多次测量（不少于5次）取平均值记为 θ_b 。
- 根据式（15）计算激光雷达垂直方向视场角。

$$FOV_v = |\theta_t - \theta_b| - \beta_v \dots\dots\dots (15)$$

式中：

FOV_v ——激光雷达垂直方向视场角；

β_v ——漫反射板相对于激光雷达测距中心在垂直方向的张角。

6.2.6 角度分辨率试验

角度分辨率试验见附录D。该试验方法不适用于采用MEMS技术的激光雷达。

6.2.7 反射特性试验

参考附录A对激光雷达的视场区域进行划分。参考图2所示布置试验设备，使用满足附录C要求的10%和50%、90%反射率的漫反射板及符合GB/T 18833规定的V类反光膜完全覆盖的平整反射板。激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下。

- a) 在高精度转台上安装激光雷达。
- b) 在距激光雷达水平距离 $(d_{Nmin} + 2\text{ m}) \begin{matrix} +5\text{ cm} \\ -5\text{ cm} \end{matrix}$ 处竖直放置 10%反射率的漫反射板。
- c) 绕测距中心旋转激光雷达，使激光雷达任意一个视场区域的中心与漫反射板的中心点重合，记录一段连续时间内不少于 100 帧点云。
- d) 选取点云中漫反射板中心点上下 1° 、水平左右 1° 范围内有效点，有效点的光应完全照射在漫反射板上，有效点的数量应不少于 200 个。从点云数据中获得这些有效点的反射特性值记为 R_1 、 R_2 …… R_n 。按照式 (16) 计算反射特性平均度。

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum(R_i - \frac{\sum R_i}{n})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

R_i ——第*i*个有效点的反射特性；

n ——选取有效点的数量；

σ_r ——反射特性精度。

- e) 重复步骤 c) ~d) 依次测试其它视场区域的反射特性精度。
- f) 调整激光雷达与漫反射板中心点垂线距离，重复步骤 c) ~e) 依次测试其它视场区域的反射特性精度。可选择 $0.25d_{Nmax} \begin{matrix} +5\text{ cm} \\ -5\text{ cm} \end{matrix}$ 、 $0.5d_{Nmax} \begin{matrix} +5\text{ cm} \\ -5\text{ cm} \end{matrix}$ 、 $0.75d_{Nmax} \begin{matrix} +5\text{ cm} \\ -5\text{ cm} \end{matrix}$ 和 $d_{Nmax} \begin{matrix} 0 \\ -5\text{ cm} \end{matrix}$ 设置测试距离。
- g) 重复步骤 b) ~f) 依次更换尺寸相同的 50%、90%反射率的漫反射板和符合 GB/T 18833 规定的 V 类反光膜完全覆盖的平整反射板，依次测试其它视场区域的反射特性精度。

6.2.8 高反鬼像试验

参考附录A对激光雷达的视场区域进行划分。参考图2所示布置试验设备，使用符合GB/T 18833规定的V类反光膜完全覆盖的平整反射板，试验应在空旷的无高反射表面物体的场地进行。激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下。

- a) 在高精度转台上安装激光雷达。
- b) 在距激光雷达水平距离 $d_{Nmin} \begin{matrix} +15\text{ cm} \\ +5\text{ cm} \end{matrix}$ 处竖直放置反射板，漫反射板尺寸应为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。
- c) 绕测距中心旋转激光雷达，使激光雷达任意一个视场区域的中心与反射板的中心点重合。
- d) 沿激光雷达测距中心和反射板的中心连线方向缓慢平行移动反射板从距离激光雷达 $d_{min} + 10\text{ cm}$ 至 10 m 处，移动速度不超过 0.1 m/s ，记录过程中点云数据。

- e) 计算点云中超出反射板边缘一个标称分辨率的虚点数量，选取在反射板移动中单帧点云出现虚点的最大值按照式（17）计算单帧点云的虚点率。

$$R_n = \frac{n_n}{N_n} \times 100\% \dots\dots\dots (17)$$

式中：

R_n ——虚点率；

n_n ——虚点数量；

N_n ——单帧点云理论点总数量。

- f) 重复步骤 b) ~ e) 依次测试其它视场区域单帧点云的最大虚点率。
g) 将测试的反射板向左旋转 30°、45°、60°，向右旋转 30°、45°、60°，重复步骤 d) ~ f)，依次测试其它视场区域单帧点云的最大虚点率。

6.2.9 雷达间抗干扰试验

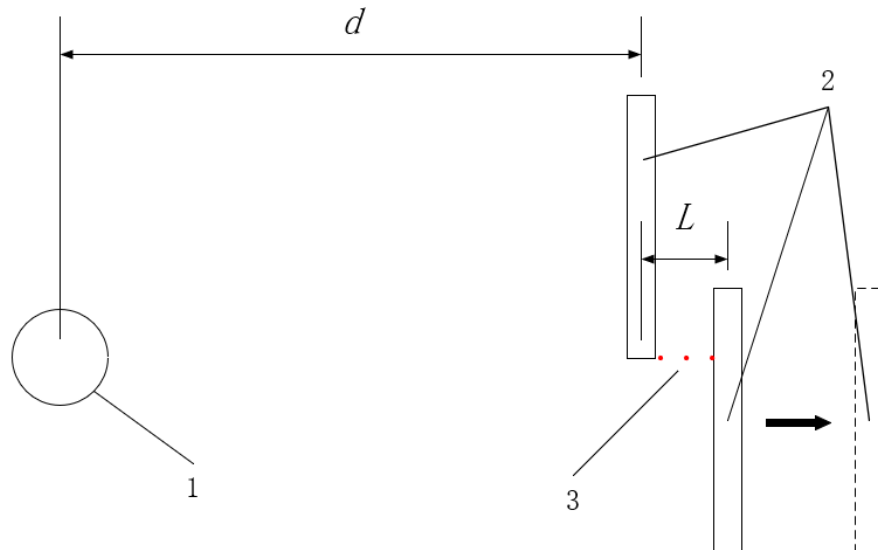
激光雷达以工作模式2.2在参考附录E定义的暗室内进行试验，试验步骤如下。

- a) 将激光雷达固定在暗室中间位置，在距离激光雷达 0.5 m、同高度处安装同型号激光雷达作为干扰设备。调整激光雷达和干扰设备的视窗位置相对，保证激光雷达在每帧扫描中与干扰设备发生一次激光对射。
b) 关闭干扰设备，记录不少于 100 帧激光雷达输出的点云。统计记录点云中超出暗室墙面、地面、天花板 6σ 距离外的点数。
c) 开启干扰设备，记录与 b) 中相同帧数的点云。统计记录点云中超出暗室墙面、地面、天花板 6σ 距离外的点数。
d) 将 c) 中获得的点数与 b) 中获得的点数做差得到虚点数，按照式（8）计算虚点率。
e) 调整激光雷达与干扰设备的距离为 1 m 和 2 m，重复步骤 a) ~ b) 获得各距离下的虚点率。

6.2.10 拖点试验

参考图5所示布置试验设备，使用满足附录C要求的90%反射率的漫反射板，激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下。

- a) 在高精度转台上安装激光雷达。
b) 在距激光雷达水平距离 $d_{Nmin} + 10 \text{ cm}$ 处竖直放置 90%反射率的漫反射板。
c) 在点云可视化设备上察看点云状态，距离漫反射板 3σ 距离外的虚点记为拖点。
d) 如有拖点存在，增加漫反射板距离激光雷达距离直至拖点消失，并记录拖点消失的距离。
e) 将前漫反射板放置在距激光雷达 $5 \text{ m} + 5 \text{ cm}$ ，在漫反射板后 $0.3 \text{ m} \pm 2 \text{ cm}$ 处平行放置另一块反射率为 90%的漫反射板，确保从激光雷达正入射角度观察，前后板部分重叠。
f) 观察点云可视化设备，同时缓慢增加两块漫反射板之间的距离，直到两板之间的拖点消失，记录拖点刚好消失时两板之间的距离。



标引序号说明：

1——激光雷达；

2——漫反射板；

3——拖点；

L ——两漫反射板之间的距离；

d ——光雷达距离漫反射板的距离。

图5 拖点试验布置

6.2.11 启动时间试验

启动时间试验步骤如下。

a) 激光雷达从工作模式 1.2 切换至工作模式 2.2，同时记录通电时刻。

b) 记录获得激光雷达首个点云数据包的时刻，按照式 (18) 计算激光雷达启动点云延迟 t_s 。

$$t_s = T_s - T_p \dots\dots\dots (18)$$

式中：

t_s ——激光雷达启动时间；

T_s ——激光雷达输出首个点云的上位机时间戳；

T_p ——激光雷达通电时刻。

6.2.12 漏检角试验

参考附录A对激光雷达的视场区域进行划分。参考图4所示布置试验设备，使用满足附录C要求的50%反射率的漫反射板。激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下。

a) 在高精度转台上安装激光雷达。

b) 使用宽 5 cm、长 20 cm、反射率 50%的漫反射长方形细杆。调节激光雷达与细杆的距离，找到激光雷达水平扫描/垂直扫描时对细杆有漏检和非漏检区域的距离。

- c) 以 0.01° 步进水平方向旋转转台，观察细杆对应点云，统计细杆对应不少于 100 帧点云的探测概率值。
- d) 以 0.01° 步进水平方向旋转激光雷达，统计细杆对应点云在不同角度对应探测概率值初次低于 50% 时对应转台旋转过的角度，将此两次的角度相减得到激光雷达水平检漏角的值。
- e) 将细杆旋转面向雷达旋转 90°。以 0.01° 步进垂直方向旋转转台，观察细杆对应点云，统计细杆对应不少于 100 帧点云的探测概率值。
- f) 以 0.01° 步进垂直方向旋转激光雷达，统计细杆对应点云在不同角度对应探测概率值初次低于 50% 时对应转台旋转过的角度，将此两次的角度相减得到激光雷垂直方向检漏角的值。
- g) 旋转激光雷达，测试其他视场区域漏检角值。

6.2.13 点频和帧频试验

激光雷达以工作模式 2.2 进行试验，试验步骤如下。

- a) 在试验台架上安装激光雷达，确保激光雷达所有视场范围均有目标物且处于测距范围内。
- b) 在激光雷达稳定工作后，记录不少于 60 s 激光雷达输出的点云数据。
- c) 统计激光雷达输出的点云中点的数量，并计算平均每秒输出的点的数量即点频。
- d) 通过解析激光雷达输出数据包内的特征数据，例如具有特定角度信息的点、具备计数信息的字段、电机转速等数据，统计得到帧的数量，并计算平均每秒输出的帧的数量即为帧频。

6.3 环境评价试验

6.3.1 功能状态试验

6.3.1.1 相对丢点率

按照 6.1.4 的规定进行环境评价试验布置，激光雷达以工作模式 2.2 进行试验，试验步骤如下。

- a) 将漫反射板与激光雷达入射法线方向垂直放置。
- b) 统计试验开始 T0 时刻，漫反射板上满足图 3 要求的点作为有效点总数，且有效点总数量宜大于 200 个。
- c) 按照式 (19) 计算雷达 T 时刻相对丢点率。

$$R_{RL} = \frac{n_T - n_{T0}}{n_T} \times 100\% \dots\dots\dots (19)$$

式中：

R_{RL} ——相对丢点率；

n_T ——T 时刻漫反射板上的有效点总数；

n_{T0} ——T0 时刻漫反射板上的有效点总数。

6.3.1.2 丢包率

按照 6.1.4 的规定进行环境评价试验布置，激光雷达以工作模式 2.2 进行试验，试验步骤如下。

- a) 统计试验开始 T0 时刻，在时长 1 分钟的连续测试时间内，激光雷达正常通讯的数据包数。
- b) 统计试验过程中 T 时刻，在时长 1 分钟的连续测试时间内，激光雷达正常通讯的数据包数。
- c) 将步骤 b) 中获得的点数与步骤 a) 中获得的点数的差即为丢失的数据包数，按照式 (20) 计算丢包率。

$$R_L = \left(\frac{n_L}{n_A} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (20)$$

式中:

R_L ——丢包率;

n_L ——丢失的数据包数;

n_A ——总发送的数据包数。

d) 重复步骤 a) ~c) 过程直至试验结束, 计算每分钟丢包率。

6.3.1.3 测距精准度

将漫反射板放置在激光雷达10 m±5 cm处, 试验过程中按照6.2.3.1的方法进行测距精度和准确度试验。

6.3.1.4 点频和帧频

按照6.2.12的方法进行点频和帧频试验。

6.3.2 电气性能试验

6.3.2.1 直流电供电电压试验

激光雷达以工作模式3.2运行, 先将直流稳压电源电压调至 U_A , 然后逐渐将电压调至 U_{Smin} 并保持稳定, 按照6.3.1进行功能状态测试; 再逐渐将电压调至 U_{Smax} 并保持稳定, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.2 过电压试验

6.3.2.2.1 ($T_{max}-20^{\circ}C$) 条件下试验

激光雷达以工作模式3.2运行, U_A 为12 V的按照GB/T 28046.2—2019中4.3.1.1.2的方法进行试验, U_A 为24 V的按照GB/T 28046.2—2019中4.3.2.2的方法进行试验。试验中和试验后, 按照6.3.1进行功能状态测试直至试验结束。

6.3.2.2.2 室温条件下试验

激光雷达以工作模式3.2运行, 按照GB/T 28046.2—2019中4.3.1.2.2的方法进行试验。试验后, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.3 叠加交流电压试验

激光雷达以工作模式3.2运行。按照GB/T 28046.2—2019中4.4.2严酷度2的方法进行试验定。试验中, 按照6.3.1进行功能状态测试直至试验结束。试验后, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.4 供电电压缓降和缓升试验

激光雷达以工作模式3.2运行, 以 $(0.5 \pm 0.1)V/min$ 的线性变化率或以不大于25mV的步长, 将供电电压由 U_A 降到0V, 然后从0V升到 U_A 。试验后, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.5 供电电压缓降和快升试验

激光雷达以工作模式3.2运行, 按照图6和表10要求的参数要求进行试验。试验后, 按照6.3.1进行

功能状态测试。

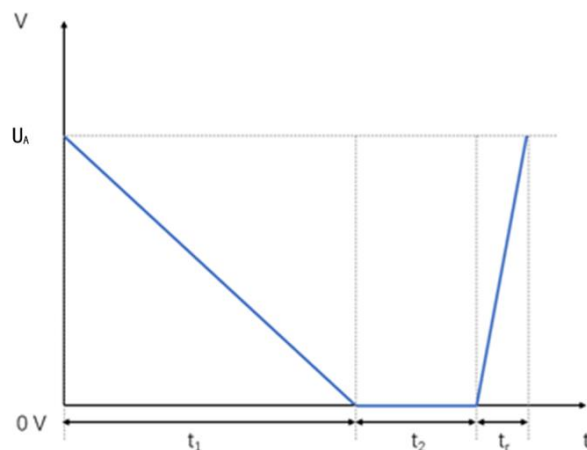


图6 供电电压缓慢下降和快速上升试验测试波形

表10 供电电压缓慢下降和快速上升试验

序号	名称	试验参数	
1	标称电压 U_n	12 V	24 V
2	试验电压 U	下降阶段 $U_n \sim 0$ V	
		上升阶段 0 V $\sim U_n$	
3	零电压维持时间 t_2	≥ 1 min	
4	电压下降速率	(0.5 ± 0.1) V/min 或不大于 25mV 的步长	
5	电压上升时间 t_r	≤ 0.5 s	
6	试验循环次数	1 次	

6.3.2.6 供电电压瞬态变化试验

6.3.2.6.1 电压瞬时下降试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.6.1.2的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.6.2 对电压骤降的复位性能试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.6.2.2的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.7 启动特性试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.6.3.2等级II的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.8 反向电压试验

激光雷达以工作模式3.1运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.7.2.3的方法进行试验。试验后切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.9 抛负载试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.6.4.2的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.10 短时中断供电试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照图7和表11要求的参数进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

表11 短时中断供电试验

序号	名称	试验参数	
1	标称电压 U_n	12 V	24 V
2	试验电压 U_t	12 V	24 V
3	试验时间	t_1 : / 步进	
		10 μ s 至 100 μ s / 10 μ s	
		100 μ s 至 1 ms / 100 μ s	
		1 ms 至 10 ms / 1 ms	
		10 ms 至 100 ms / 10 ms	
4	试验时间	100 ms 至 2 s / 100 ms	
		t_2 : ≥ 5 s, 且激光雷达的功能完全恢复	
5	试验循环次数	1 次	

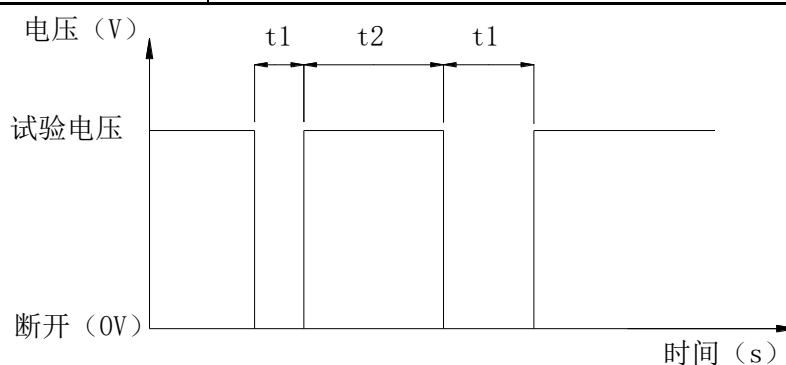


图7 短时中断供电波形

6.3.2.11 开路试验

6.3.2.11.1 单线开路试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.9.1的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.11.2 多线开路试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.9.2的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.12 短路保护试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.10.2.1的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.13 绝缘电阻试验

激光雷达以工作模式1.1运行，按照GB/T 28046.2—2019中4.12.2的方法进行试验。试验后以工作模式3.2进行试验，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.2.14 参考接地和供电偏移试验

激光雷达以工作模式3.2，按照GB/T 28046.2—2019中4.8.2的方法进行试验。试验中，按照6.3.1进行功能状态测试直至试验结束。试验后按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.3 机械性能试验

6.3.3.1 机械振动试验

激光雷达模拟在汽车上的安装方式在振动台上安装固定，以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.3—2011中4.1.2.4.2的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.3.2 机械冲击试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 28046.3—2011中4.2.2.2的方法进行试验。试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.3.3 碎石冲击试验

激光雷达以工作模式1.1运行，按照表12的参数和ISO 20567-1:2017的方法进行试验。

表12 碎石冲击试验

序号	名称	试验参数
1	试验喷丸剂量	50 g
2	试验压力	100 kPa
3	试验冲击材料	按照 ISO 11124-2 的铁丸颗粒大小(4~5) mm
4	试件上的试验面	产品模拟在汽车上安装后的暴露面
5	试验时长	(10±2) s

6.3.3.4 视窗耐磨试验

激光雷达以工作模式1.1运行，按照表13的方法进行试验。试验后清除表面铅笔痕迹，激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

表13 视窗耐磨试验

序号	名称	试验参数
1	试验材料	HB铅笔（端头为平面）
2	试验摩擦距离	视窗表面长度
	试验材料与镜头的解除面积	约2.89 mm ²
2	试验压力	(100±10) kPa
3	试验速度	60个循环/分钟（一个循环为两倍的试验摩擦距离）
4	试验循环	500

6.3.3.5 线束拉脱力试验

激光雷达以工作模式1.2运行，将产品或连接器固定，用拉力计沿线束施加产品规格书规定的轴向拉力进行试验。试验后，激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.4 防尘防水试验

6.3.4.1 防尘试验

激光雷达以工作模式1.2运行，依据表4所确定的外壳防护等级，按照GB/T 30038—2013中8.3.3的方法进行试验。试验后，激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.4.2 防水试验

激光雷达以工作模式1.2运行，依据表4所确定的外壳防护等级，按照GB/T 30038—2013中8.4的方法进行试验。试验后，激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5 环境耐候性试验

6.3.5.1 低温试验

6.3.5.1.1 低温贮存试验

激光雷达以表5规定的的贮存温度下限和工作模式1.1，按照GB/T 28046.4—2011中5.1.1.1.2的方法进行试验。试验后静置2 h恢复室温，激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.1.2 低温工作试验

激光雷达以 T_{min} 和工作模式2.2，按照GB/T 28046.4—2011中5.1.1.2.2的方法进行试验。试验中，按照6.3.1进行功能状态测试直至试验结束。试验后静置2h恢复室温，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.2 高温试验

6.3.5.2.1 高温贮存试验

激光雷达以表5规定的的贮存温度上限和工作模式1.1，按照GB/T 28046.4—2011中5.1.2.1.2的方法进行试验。试验后静置2 h恢复室温，激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.2.2 高温工作试验

激光雷达以 T_{max} 和工作模式3.2，按照GB/T 28046.4-2011中5.1.2.2.2的方法进行试验。试验中，按照6.3.1进行功能状态测试直至试验结束。试验后静置2h恢复室温，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.3 温度梯度试验

激光雷达在 $T_{\min} \sim T_{\max}$ 范围以工作模式3.2, 按照GB/T 28046.4—2011中5.2.2的方法进行试验, 当每个温度阶段达到稳定时, 激光雷达分别以 $U_{S\min}$ 和 $U_{S\max}$ 运行, 按照6.3.1进行功能状态测试。试验后静置2 h 恢复室温, 以工作模式3.2进行试验, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.4 温度循环试验

6.3.5.4.1 规定变化率的温度循环试验

激光雷达在 $T_{\min} \sim T_{\max}$ 范围以工作模式1.2, 按照GB/T28046.4—2011中5.3.2.2的方法进行试验。在每个循环稳定至 T_{\min} 和循环的210min~410min期间, 将激光雷达切换至工作模式3.2, 按照6.3.1进行功能状态测试。试验后静置2h恢复室温, 将激光雷达切换至工作模式3.2, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.4.2 规定转换时间的温度快速变化试验

激光雷达在 $T_{\min} \sim T_{\max}$ 范围以工作模式1.1, 按照GB/T 28046.4—2011中5.3.2.2的方法进行试验。试验后静置2 h恢复室温, 将激光雷达切换至工作模式3.2, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.5 水飞溅试验

激光雷达以工作模式1.2及3.2运行, 按照GB/T 28046.4—2011中5.4.2.1的方法进行试验。试验后按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.6 浸没试验

激光雷达以工作模式3.2运行, 按照GB/T 28046.4—2011中5.4.3.1的方法进行试验。试验后按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.7 盐雾渗漏和功能试验

激光雷达以工作模式1.2和3.2, 按照GB/T 28046.4-2011中5.5.2.2的方法进行试验。试验后切换至工作模式3.2, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.8 湿热循环试验

激光雷达设置为工作模式1.2, 按照GB/T 28046.4-2011中5.6.2.2的方法进行试验, 在每个循环达到最高温度时, 将激光雷达切换至工作模式3.2, 按照6.3.1进行功能状态测试。试验后静置2h恢复室温, 将激光雷达切换至工作模式3.2, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.9 稳态湿热试验

激光雷达设置为工作模式2.1, 按照GB/T 28046.4-2011中5.7.2的方法进行试验, 试验最后一小时, 将激光雷达切换至工作模式3.2, 按照6.3.1进行功能状态测试直至试验结束。试验后静置2h恢复室温, 按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.5.10 太阳光辐射试验

激光雷达以工作模式1.1运行, 安装在汽车厢体内部的产品按照GB/T 16422.2-2022中表2(方法B)和表3循环2的规定进行600 h试验; 安装在汽车厢体外部的产品按照GB/T 16422.2-2022中表1(方法A)

和表3循环1的规定进行600 h试验。

6.3.5.11 化学负荷试验

安装在汽车厢体外部的产品，以工作模式1.1按照GB/T 28046.5—2015中表2安装位置代码[D]选择试剂和暴露条件以及表5的湿润方法和4.8的程序进行试验。安装在汽车厢体内部的产品，以工作模式1.1按照GB/T 28046.5—2015中表2安装位置代码[B]选择试剂和暴露条件以及表5的湿润方法和4.8的程序进行试验。试验后将激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.6 电磁兼容性试验

6.3.6.1 对静电放电抗扰性试验

6.3.6.1.1 激光雷达通电

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 19951—2019附录C中表C.1、C.2、C.3的类别1试验严酷等级不低于L3的测试电压要求和第8章规定的方法进行试验。试验中和试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.6.1.2 激光雷达不通电

激光雷达以工作模式1.2运行，按照GB/T 19951—2019附录C中表C.1、C.2的类别1试验严酷等级不低于L3的测试电压要求和第9章规定的方法进行试验。试验后将激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.6.2 由传导和耦合引起的电骚扰试验

6.3.6.2.1 沿电源线的电瞬态传导抗扰试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照表6规定的抗扰试验等级和GB/T 21437.2—2021中4.4的方法进行试验。试验中和试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.6.2.2 除电源线外的导线通过容性和感性耦合的电瞬态发射试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 21437.3—2021表B.1、B.2中CCC模式等级III的要求和3.4.2的方法进行试验。试验中和试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.6.3 对电磁辐射的抗扰性试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB 34660—2017中4.7的电波暗室法、大电流注入法的抗扰试验强度和5.7的方法进行试验。试验中和试验后，按照6.3.1进行功能状态测试。

6.3.6.4 无线电骚扰特性试验

6.3.6.4.1 传导发射试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 18655—2018中6.3、6.4的方法进行试验。

6.3.6.4.2 辐射发射试验

激光雷达以工作模式3.2运行，按照GB/T 18655—2018中6.5的方法进行试验。

6.3.7 耐久性试验

6.3.7.1 高温耐久性试验

激光雷达在 T_{max} 以工作模式3.2运行47 h和工作模式1.2运行1 h为循环进行试验，试验持续时间见附录F.2。在试验持续时间的25%、50%、75%时和试验后，将激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态试验。

6.3.7.2 温度交变耐久性试验

激光雷达按照表14规定的方法和图8的温度曲线进行试验，试验循环、循环次数和试验总时间参考附录F.3。在试验持续时间的25%、50%、75%和试验后，将激光雷达切换至工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态试验。

表14 温度交变耐久性试验方法

序号	名称	试验参数
1	工作模式和循环	1.2 和 2.1 交替循环
2	试验温度曲线	见图 8
3	最低试验温度	T_{min}
4	最高试验温度	T_{max}
5	温度梯度	4 °C / min
6	在 T_{min} 和 T_{max} 下保持时间	在温度完全渗透之后 15 min

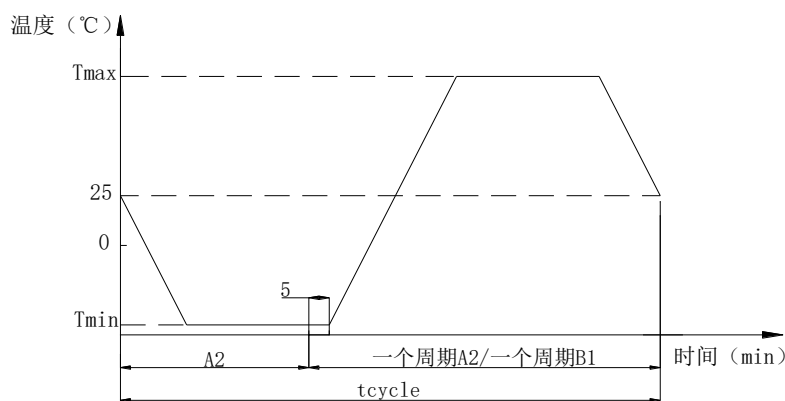


图8 试验温度曲线

6.3.7.3 高温高湿耐久试验

激光雷达在65 °C，相对湿度93%±3%环境下，以工作模式3.2运行，试验总时间参考附录F.4。在试验期间按照试验持续时间的25%、50%、75%和试验后，激光雷达以工作模式3.2，按照6.3.1进行功能状态试验。

6.3.8 视窗遮挡试验

激光雷达以工作模式3.2运行，试验步骤如下。

- a) 使用不透光且10%~50%漫反射率的材料制作15 mm×15 mm的方形遮挡物。
- b) 把激光雷达视窗外表面均匀分成9个区域。
- c) 将遮挡物粘贴在视窗表面其中一个区域的中心位置，观察激光雷达是否有报警信息输出。
- d) 移除视窗表面遮挡物后（保证视窗表面清洁），再观察是否有报警信息。
- e) 将遮挡物依次粘贴在激光雷达视窗表面其他区域，重复c)和d)步骤分别进行测试。

注：试验过程激光雷达视场角距离雷达1 m的区域内除遮挡物外不应有其他目标。

7 检验规则

7.1 型式检验

雷达的出厂检验项目至少应包括外观、结构检查和功能测试，功能状态应满足5.3.1的要求。

7.2 抽样和分组

型式试验应从出厂检验合格雷达中按照GB/T 2828.1规定的一次抽样方案进行抽取。先按出厂检验的项目进行复检，复检合格后的样品数量为每组1个共计8组，每件样品应编上样品编号和分组编号。

激光雷达按分组分别进行以下试验。

- a) 第1组：功能测试、盐雾试验。
- b) 第2组：电气负荷试验、水飞溅试验、浸没试验、线束拔脱力试验。
- c) 第3组：温度试验、湿热试验、化学负荷试验。
- d) 第4组：视窗耐磨、机械冲击试验。
- e) 第5组：振动试验、碎石冲击试验。
- f) 第6组：防护等级试验、冰水冲击试验。
- g) 第7组：电磁兼容试验、太阳光辐射试验。
- h) 第8组：耐久性试验。

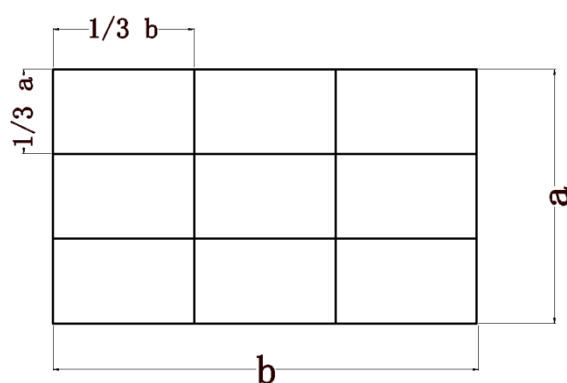
7.3 合格判定

雷达的型式试验项目应全部符合规定的要求。如有一项不合格，可重新抽取加倍数量的样品就该不合格项目进行复检，如仍有不合格时，则该批样品判为不合格。但对耐久性试验不合格时不应重新抽取，直接判为不合格。

附录 A
(资料性)
视场区域划分方法

激光雷达的视场角可根据测试的需要均匀划分为若干视场区域，例如九宫格划分，如图A.1所示。划分方法宜尽量使各视场区域形状规整，有利于实际测试的操作。划分的视场区域越多、各视场区域包含的理论点越少会更加细致地表达激光雷达的性能表现。

注：在进行同一项性能试验时，不同类型的激光雷达可以采用不同的视场区域划分方法。



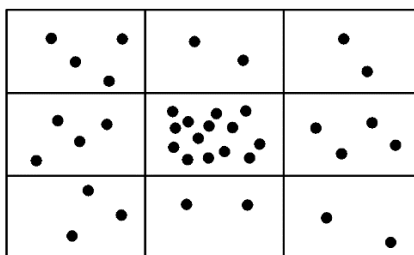
标引序号说明：

a——垂直方向视场角；

b——水平方向视场角。

图A.1 九个视场区域划分

示例1：



示例2：

•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•

附录 B

(资料性)

激光雷达场景试验方法

参考图2所示布置测试设备，使用满足附录C要求的1m × 1m且10%反射率漫反射板、白衣行人、黑衣行人、白色轿车、黑色轿车和标准路锥。激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下：

- a) 在可旋高精度转台上安装激光雷达。
- b) 在距激光雷达 d_{init} (见表B.1) 处放置漫反射板，并使用高精度测距设备确保被测目标和激光雷达之间距离误差不大于±5mm。
- c) 调整激光雷达离地高度0.5m~0.7m使得被测目标处于激光雷达中心区域。
- d) 记录超过100帧数据后依据被测物对应间距向远处移动被测目标，并重复测试点云数据，直到无法连续获得100帧数据或者单帧被测目标的点云的点数量少于3，记录上一距离为该被测目标的最远距离。
- e) 调整激光雷达转台使激光雷达剩余视场区域中心与被测目标中心重合，重复步骤b)~d)。
- f) 重复 b)~e)，直至所有被测目标完成测试。

表B.1 被测目标列表

被测目标	d_{init} (单位: 米)	间隔距离 (单位: 米)
10%漫反射板	50	10
白衣行人	50	10
黑衣行人	50	10
白色轿车	100	10
黑色轿车	100	10
标准路锥	20	5

附 录 C
(规范性)
漫反射板要求

试验使用的漫反射板的表面宜具备朗伯体特性，即接近理想的漫反射面。

试验使用的漫反射板的反射率应满足在试验要求反射率的 $\pm 2\%$ 误差范围内。

漫反射板的反射率应经过光谱仪的标定。标定的光谱范围应包含被测雷达所发射激光的波段。标定时间超过12个月的漫反射板须重新进行标定。标定漫反射板所使用的光谱仪应满足JJF 1601的要求。

注：入射能量以入射点为中心，在整个半球空间内向四周各向同性的反射能量的现象称为漫反射。

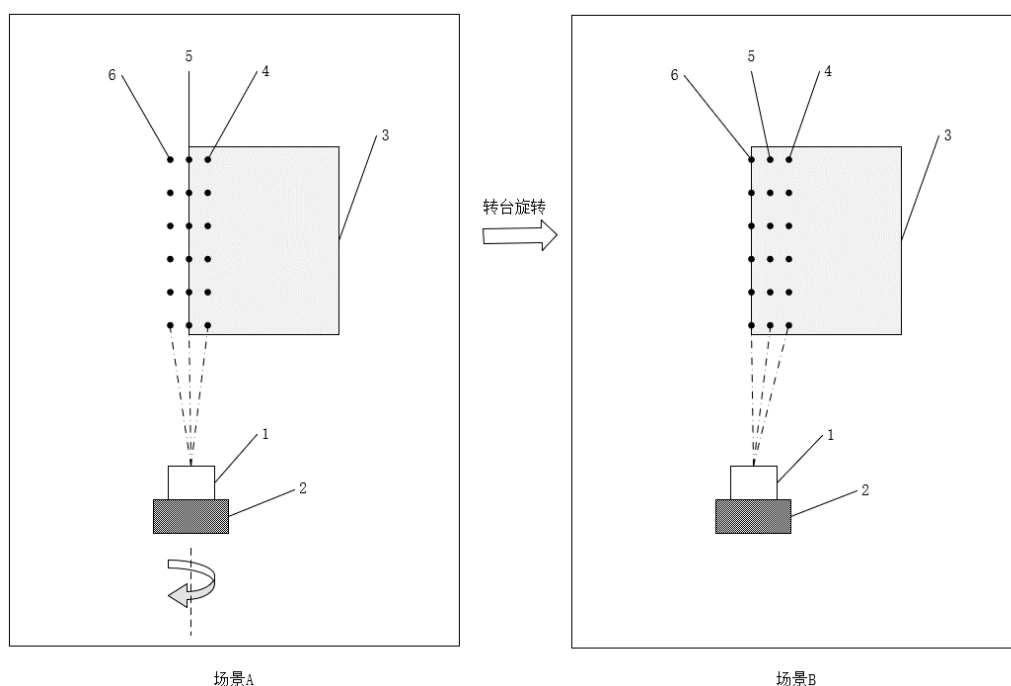
附录 D

(资料性)

角度分辨率试验方法

参考附录A对激光雷达的视场区域进行划分。参考图2所示布置试验设备，使用满足附录C要求的90%反射率的漫反射板，激光雷达以工作模式2.2进行试验，试验步骤如下：

- a) 在高精度转台上安装激光雷达。
- b) 在距激光雷达水平距离 $(d_{Nmin} + 1\text{ m}) \begin{matrix} +5\text{ cm} \\ -5\text{ cm} \end{matrix}$ 处竖直放置漫反射板，漫反射板尺寸宜为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，绕测距中心旋转激光雷达，使漫反射板出现在激光雷达其中一个视场区域内。
- c) 通过点云可视化设备观察激光雷达输出的点云，水平旋转激光雷达，记录打在漫反射板左或右边缘位置的一个或一列点云由图 D.1 中“第 2 个/列点云”变为“第 3 个/列点云”（场景 A 到场景 B）转台转过的角度，即为该视场区域的水平角度分辨率。相同的，垂直旋转激光雷达，记录漫反射板上或下边缘位置的一个或一列点云变化转台转过的角度即为该视场区域垂直角度分辨率。
- d) 重复步骤 c) 测试其他视场区域的水平角度分辨率和垂直角度分辨率。



标引序号说明：

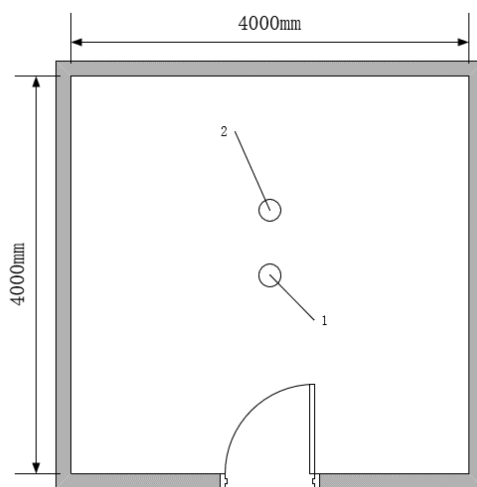
- 1——激光雷达；
- 2——高精度转台；
- 3——漫反射板；
- 4——第1个/列点云；
- 5——第2个/列点云；
- 6——第3个/列点云。

图 D.1 激光雷达角度分辨率测试

附录 E
(资料性)
暗室布置要求

E.1 暗室尺寸

激光雷达在试验时保证激光雷达到暗室墙面的距离大于激光雷达的测近能力。例如，暗室的长度和宽度为4 m，高度不小于2 m，参考图E.1的对暗室进行布置。



标引序号说明：

1——被测激光雷达；

2——干扰设备。

图E.1 暗室布置

E.2 暗室表面材料

暗室内部墙面、地面、屋顶均应覆盖低反射率材料，如黑色绒布，覆盖材料表面的反射率应不超过10%。

附录 F
(资料性)
耐久性试验计算模型

F.1 产品在汽车上安装位置的典型温度模型

F.1.1 产品在汽车安装位置的平均温升

产品在汽车上不同安装位置的平均温升如表F.1所示。

表F.1 不同安装位置的温度模型和平均温升

汽车上的安装位置	位置温度模型	位置平均温生升 (ΔT)
无特殊的要求	1	36K
乘客舱内阳光直射区域	2	46K

F.1.2 产品在不同温区的占比

产品的安装位置温度模型1见表F.2；安装位置温度模型2见表F.3。

表F.2 位置温度模型 1

温度 (T_i) ℃	温度占比 (P_i) %
-40	6
23	20
40	65
80	8
85	1

表F.3 位置温度模型 2

位置温度 (T_i) ℃	温度占比 (P_i) %
-40	6
23	20
50	65
85	8
90	1

F.2 高温耐久性试验 Arrhenius 计算模型

为了计算高温耐久寿命试验的持续时间，应按照部件的应用条件，并结合温度分布百分比计算汽车在当前场地下的工作小时 t_{oper} 进行考虑。温度集中模型见表F.4。

表F.4 温度集中模型

温度 (T_i)	位置温度分布 (P_i)
--------------	------------------

$T.1$	$P1$
$T.2$	$P2$
.....
$T.n$	Pn

对于 $T.1$ $T.n$ 的各个温度，按式 (F.1) 计算模型的加速度系数 $AT.1$ $AT.n$ 。

$$AT.i = e^{\{-(EA/K) \times [1/(T_{test}+273.15) - 1/(T.i+273.15)]\}} \dots\dots\dots (F.1)$$

式中：

$AT.i$ ——Arrhenius 模型的加速度系数；

EA ——激活能量 $EA=0.45$ eV；

K ——玻尔兹曼常数 ($K=8.617 \times 10^{-5}$ eV/K)；

T_{test} ——试验温度 [°C]，通常为 T_{max} ；

$T.i$ ——按照应用曲线在温度集中之后的位置温度；

-273.15°C——温度的绝对零点；

按式 (F.2) 计算加速度系数得出高温耐久性试验的持续时间。

$$t_{test} = T_{oper} \sum Pi / AT.i \dots\dots\dots (F.2)$$

式中：

T_{test} ——高温耐久性试验的试验持续时间 (h)；

T_{oper} ——安装位置的耐久性工作时间；

Pi ——产品在安装位置温度 $T.i$ 下的工作时间百分比数；

$AT.i$ ——温度 $T.i$ 的加速度系数。

示例：以耐久性为 10 年，每天工作 2h， t_{oper} 为 7300h，表 F.2 位置温度模型 1 给出的 $T.i$ ， $T_{test}=T_{max}=85^\circ\text{C}$ 为例计算，由公式 G.1 计算可得出：

$$AT.1 = 2484$$

$$AT.2 = 21.22$$

$$AT.3 = 8.12$$

$$AT.4 = 1.23$$

$$AT.5 = 1.00$$

由式 (F.2) 计算可得出：

$$t_{test} = 7300 \times [(0.06/2484) + (0.20/21.22) + (0.65/8.12) + (0.08/1.23) + (0.01/1)] \approx 1200 \text{ (h)}$$

即：高温耐久寿命试验的持续时间为 1200h。

F.3 温度交变耐久性试验 Coffin-Manson 计算模型

为了计算温度交变条件下的耐久性试验的持续时间，应考虑产品由表 G.1 安装位置 ΔT 的平均温度变化和寿命期间的温度循环次数 N_{cycle} 。

按式 F.3 计算 Coffin-Manson 模型的加速度系数与场地平均温度变化的关系：

$$ACM = (\Delta T_{test} / \Delta T)^c \dots\dots\dots (F.3)$$

式中：

ACM ——Coffin-Manson 模型的加速度系数；

ΔT_{test} ——在一次试验循环期间的温差 ($\Delta T_{test} = T_{max} - T_{min}$)；

ΔT ——在场地使用寿命期间的平均温差，见表F.1；
 C ——Coffin-Manson 模型参数（在本文件中 c 固定设置为2.5）。
按式F.4计算试验循环的总次数：

$$N_{test} = N_{cycle} / ACM \dots\dots\dots (F.4)$$

式中：
 N_{test} ——试验循环次数；
 N_{cycle} ——在安装位置使用寿命期间的温度循环次数；
 ACM ——Coffin-Manson模型的加速度系数。

以耐久性为10年，每天使用2次， N_{cycle} 为7300次，表G.2位置温度模型1给出的 $T_{min} = -40^\circ\text{C}$ 和 $T_{max} = 85^\circ\text{C}$ ，由表F.1安装位置平均温升 $\Delta T = 36\text{K}$ 的产品为例进行计算：

$$\Delta T_{test} = 85^\circ\text{C} - (-40^\circ\text{C}) = 125^\circ\text{C}$$

按公式G.3计算出Coffin-Manson模型的加速度系数为：

$$ACM = (125/36)^{2.5} = 22.47$$

按公式G.4计算出试验循环次数为：

$$N_{test} = 7300 / 22.47 \approx 325 \text{ 次}$$

产品温度热浸透的时间为15 min，设定温度在20 min后浸透部件，则保持时间为35 min来计算一次循环的时间为： $t_{cycle} = 2 \times [(T_{max} - T_{min} / 4^\circ\text{C}/\text{min}) + 35 \text{ min}] = 132.5 \text{ min}$

325次循环时整个试验时间为：

$$t = (325 \times 132.5 \text{ min}) / 60 \text{ min} = 717.7 \text{ h}$$

即：温度交变耐久性试验的每个循环时间为132.5 min，总循环次数为325次，试验总的时间为717.7 h。

F.4 高温高湿耐久试验 Lawson 计算模型

为了计算高温高湿耐久试验的持续时间，按式F.5计算Lawson模型。

$$t_{test} = \frac{t_F}{A_{T/RH}} \dots\dots\dots (F.5)$$

式中：
 t_{test} ——测试时间（h）；
 $A_{T/RH}$ ——高温高湿加速因子；
 t_F ——主机厂要求寿命期间内汽车不运行的时间。
加速因子按式F.6计算：

$$A_{T/RH} = e^{\left[-\left(\frac{E_A}{k}\right) \left(\frac{1}{T_{test} + 273.15} - \frac{1}{T_F + 273.15} \right) \right]} + b \times [(RH_{test})^2 - (RH_F)^2] \dots\dots\dots (F.6)$$

式中：
 E_A ——活化能；
 k ——玻尔兹曼常数（ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ）；
 b ——设计常数（ 5.57×10^{-4} ）；
 T_{test} ——高温高湿耐久试验中的试验温度（ $^\circ\text{C}$ ）；
 T_F ——车辆停止环境的平均温度值（ $^\circ\text{C}$ ）；

RH_{test} ——高温高湿耐久试验中的试验湿度（%）；

RH_F ——车辆停止环境的平均湿度值（%）。

在 $T_{test} = 65^{\circ}\text{C}$, $RH_{test} = 93\%$ 测试条件下, 其他参数选择 $E_A = 0.4\text{eV}$, $T_{FieldParking} = 23^{\circ}\text{C}$, $RH_F = 65\%$, 带入Lawson模型公式, 得到加速因子 $A_{T/RH} = 82$, 取 $t_F = 10$ 年, 得到测试时间为1064h。
