



天津市地方计量技术规范

JJF (津) 160-2026

电动自行车目标物 校准规范

Calibration specification for electric bicycle targets

2026-01-04 发布

2026-04-04 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

电动自行车目标物 校准规范

Calibration specification
for electric bicycle

JJF(津) 160-2026

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：中汽研汽车检验中心（天津）有限公司
天津大学

参加起草单位：天津市计量监督检测科学研究院
中国船舶集团有限公司第七〇七研究所
天津摩托车质量监督检验所

本规范委托中汽研汽车检验中心（天津）有限公司负责解释

本规范主要起草人：

苏 衡 （中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

冯 珠 （中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

郑叶龙 （天津大学）

韩艳祥 （中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

付松青 （中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

参加起草人：

姜 与 （中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

谢 宁 （天津市计量监督检测科学研究院）

韩 瑀 （中国船舶集团有限公司第七〇七研究所）

王 昊 （天津摩托车质量监督检验所）

目 录

引 言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(3)
6 校准条件	(4)
7 校准项目和校准方法	(5)
8 校准结果	(7)
9 复校时间间隔	(8)
附录 A	(9)
附录 B	(11)
附录 C	(13)

引 言

JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范根据电动自行车目标物的技术指标、实际使用状态以及校准需求,参照 GB 17761-2018《电动自行车安全技术规范》,ISO 19206-4:2020(E)《道路车辆-评定主动安全功能的目标车辆、易受伤害的道路使用者和其他物体的试验装置》,ISO/DIS 19206-5《道路车辆-用于目标车辆、弱势道路使用者和其他物体的测试设备,用于评估主动安全功能第5部分:动力两轮车目标的要求》,主要技术指标的确定参照这些规范与实际使用需求共同确定。

本规范依据电动自行车目标物的使用场景,参照 ISO 8608:2016《机械振动—路面纵断面—测量数据的报告》,制定了校准场地的技术要求。

本规范为首次发布。

电动自行车目标物校准规范

1 范围

本规范适用于电动自行车目标物的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则

GB 17761-2018 电动自行车安全技术规范

ISO 8608: 2016 (Mechanical vibration-Roadsurface profiles - Reporting of measured data), 机械振动—路面纵断面—测量数据的报告。

ISO 19206-4:2020(E) (Road vehicles—Test devices for target vehicles, vulnerable road users and other objects, for assessment of active safety functions), 道路车辆-评定主动安全功能的目标车辆、易受伤害的道路使用者和其他物体的试验装置。

ISO 19206-5 (Road vehicles- Test devices for target vehicles vulnerable road users and other objects, for assessment of active safety functions), 道路车辆-用于目标车辆、弱势道路使用者和其他物体的测试设备, 用于评估主动安全功能第 5 部分: 动力两轮车目标的要求

凡是注日期的引用文件, 仅注日期的版本适用本规范; 凡是不注日期的引用文件, 其最新版本(包括所有的修改单)适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 电动自行车目标物 electric bicycle targets

用于进行主动安全驾驶系统测试的电动自行车模拟测试设备, 见图 1。



图 1 电动自行车目标物

3.2 雷达散射截面积 radar cross section (RCS)

雷达散射截面积是雷达隐身技术中最关键的概念，它表征了目标在雷达波照射下所产生回波强度的一种物理量。雷达目标和散射的能量可以表示为一个有效面积和入射功率密度的乘积，这个面积通常称为雷达散射截面积（以下简称为 RCS）。

一个目标物的 RCS 等于单位立体角目标在雷达接收天线方向上反射的功率(每单独立角)与入射到目标处的功率密度(每平方米)之比，单位为 dBsm。

4 概述

通过它可开展车辆直行与近端被遮挡的横穿电动自行车测试场景(CBNA0)、车辆直行与前方纵向行驶的电动自行车测试场景(CBLA)等测试，检验车辆的 AEB 功能，使测试更符合实际道路交通情况，有助于提高车辆自动驾驶水平和道路交通安全。

该目标物基于国内典型道路交通参与者的特点开发，能在 ADAS 系统/主动安全功能和不同层级自动驾驶系统测试试验中模拟典型电动自行车的几何、红外及 RCS 特性。其特征必须确实可靠，并且通过各种传感技术使目标物应被识别为真实的车辆。试验中在可能发生碰撞的情况下，目标物可替代为评估 ADAS 系统/主动安全功能和不同层级自动驾驶系统的待识别碰撞体。

电动自行车目标物各部分连接成一个整体，包括车架、前叉、车轮、车把等。车架通常由具有一定硬度和刚度的复合材料制成，以满足对其防撞性能和坚固性能的要求。

5 计量特性

5.1 外观尺寸

表 1 电动自行车目标物尺寸

序号	部位	标称值/mm	最大允许误差/mm
1	前后轮之车轮轴距离	1020	± 20
2	前轮直径	370	± 10
3	后轮直径	370	± 10
4	踏板离地间隙	160	± 20
5	车轮离地间隙	0	± 5
6	总高度	1575	± 25
7	后部高度	600	± 20
8	车把高度	1025	± 20
9	座高	725	± 15
10	车牌高度	390	± 10
11	后反射器高度	525	± 15
12	前灯高度	920	± 10
13	侧面反射器高度	275	± 10
14	骑行者膝盖宽度	540	± 10
15	骑行者脚跟宽度	325	± 5
16	骑行者肩宽度	420	± 10
17	骑行者手部宽度	630	± 10
18	头盔宽度	240	± 10
19	前轮宽度	60	± 5
20	后轮宽度	60	± 5
21	车牌宽度	175	± 5
22	骑行者胸厚	210	± 10
23	骑行者躯干长度	480	± 15

5.2 近红外辐射区反射比/反射因数

目标物皮肤、服装、假发、车架等的红外反射率范围可参考表2

表 2 目标物各部件的红外特性

序号	部位	反射比/反射因数
1	黑色顶部和鞋子	40%~70%
2	头发	20%~60%
3	皮肤、面部和手部	40%~60%
4	裤子	40%~70%

5	橡胶轮胎(外部)	3%~9%
6	车架	2%~20%

5.3 雷达散射截面积

雷达散射截面积差值一般不大于 $\pm 5\text{dBsm}$ 。

注：以上要求不适用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(-5\sim 40)^\circ\text{C}$ ；

6.1.2 环境湿度： $(5\sim 70)\%\text{RH}$ ；

6.1.3 其他环境条件：

RCS 校准时，风速不大于 2.5m/s ；场地平整干燥，在整个测量区域表面覆盖柏油或混凝土，试验自由空间内的地面或周围区域不得有金属或其他强雷达散射部件，场地应无影响雷达载体系统工作的电磁干扰。

6.2 主要测量标准及配套设备

测量标准及其他设备需符合表 3 要求。

表 3 测量标准及其他设备

序号	设备名称	技术指标
1	钢卷尺	测量范围： $(0\sim 5)\text{m}$ ； 准确度等级：II 级
2	漫反射测量光谱仪	测量范围：波长范围为 $(780\sim 2000)\text{nm}$ ， 近红外辐射区反射比/反射因数示值误差： ± 0.05
3	毫米波雷达及载体系统 频带： $(76\sim 81)\text{GHz}$	法线最远探测距离： $(> 200\text{m})$ 宽视场最远探测距离： $(> 50\text{m})$ 距离精度： $(< 0.5\text{m})$ 距离分辨力： $< 2\text{m}$ 60 米角度范围： $(> 40^\circ)$ 120 米角度范围： $(> 10^\circ)$ 角度精度： $(< 1.00^\circ)$ 载体直线速度范围 $0.1\sim 25\text{km/h}$ ，MPE： $\pm 0.1\text{ km/h}$ 载体横纵向定位 范围 $\pm 50\text{ m}$ ，MPE： $\pm 0.05\text{ m}$
4	标准角反射器	建议用三面角反射器， $\text{RCS}=10\text{dBsm}$

5	风速仪	显示分辨力 0.1 及以上
6	反射比标准板	含两个标称范围, 定值误差不超过 5%
7	目标物旋转平台	可自由转换角度

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目包括外观尺寸、近红外辐射区反射比/反射因数、雷达散射截面积。

7.2 外观尺寸

校准前, 应先对目标物的外观进行初步的检查, 判断待检查物品外观是否完好。

使用钢卷尺或同等级标准器具, 配合直角夹板等辅助设备, 分别对目标物的相应部件的外形尺寸进行相应的测量, 测得相关尺寸参量, 其尺寸特性值及允差参数见表 1, 按公式 (1) 计算外形尺寸差值。

$$\Delta_i = x_i - m_i \quad (1)$$

式中:

Δ_i —— 第 i 测量点的示值误差, mm;

x_i —— 第 i 测量点尺寸测量值, mm;

m_i —— 第 i 测量点既定标称值, mm。

7.3 近红外辐射区反射比/反射因数

7.3.1 校准前准备

在开始测量前, 将光谱仪探头对反射比标准板 (反射比为 99%) 进行测量, 即标准器自校。自校完成后, 使用反射比为 50% 或 20% 的反射比标准板对校准情况进行验证, 若测量值与反射比标准板标准值不符合, 需要重复上述校正操作, 直至设备符合要求。

7.3.2 校准方法

选取目标物相应部位的平整区域, 移动光谱仪探头对测量目标物同部位适当选取三个位置进行测量, 并记录值。

测得红外反射率的数值, 重复测量 3 次, 取平均值作为测量结果。

$$\overline{X}_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (2)$$

式中:

$\overline{X}_i$ ——第 i 测量点的测量平均值, %;

x_1 、 x_2 、 x_3 ——第 i 测量点尺寸测量值, %;

7.3 雷达散射截面积

7.3.1 校准前准备

开始校准之前, 用已知 RCS 的标准角反射器对雷达进行校正。按照下列步骤进行:

将标准角反射器安装在中心距地面 $500 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ 的位置, 使用非反射材料遮挡角反射器安装夹具, 消除安装夹具对雷达校准的影响;

调整雷达安装位置, 使其中心高度与角反射器中心位置一致, 雷达靠近标准角反射器, 使雷达正对标准角反射器;

使用雷达车载体系统, 使雷达以 $(3 \sim 5) \text{ km/h}$ 的速度从距离标准角反射器到 60 m 的位置运动到距离标准角反射器 4 m 的位置, 采集运动过程中雷达测得的标准角反射器的 RCS 数据, 取采集结果的中位值为单次测量值, 重复测量 2 次, 取 2 次平均值的数据与标准角反射器的标准值作比较, 用公式 (3) 计算修正系数 A , 以此为依据对雷达的测量值做修正。

$$A = \text{RCS}_B - \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (3)$$

式中:

A ——雷达的修正系数, dBsm;

RCS_B ——标准角反射器的标称 RCS, dBsm;

r_1 、 r_2 ——2 次校准中, 雷达测量标准角反射器 RCS 值的中位值, dBsm。

7.3.2 校准方法

将待测目标物固定平稳安置于旋转平台上, 选择 $(0/45/90/135/180)^\circ$ 为校准点, 并调整至相应角度进行测量, 将 0° 位定义为目标物朝向相对于车辆的方向 (见图 2)。使用毫米波雷达载体系统作匀速直线运动, 在校准范围内动态重复测量 2 次, 距离要求 $(5 \sim$

50) m, 速度要求 (5 ± 0.2) km/h, 无明显冲击性加减速情况, 整个检测过程完成后, 对获得的 RCS 数据做分段分析, (5-10) m 为近段, (10-35) m 为中段, (35-50) m 为远段。分别计算单次测量中三段距离采集 RCS 数据的平均值;

$$RCS_i = \frac{r_{i,1} + r_{i,2}}{2} \quad (4)$$

式中:

RCS_i ——雷达在第 i 距离段测得的 RCS, dBsm;

$r_{i,1}$ 、 $r_{i,2}$ ——第 i 距离段, 被校 2 次校准中, 单次 RCS 数据的平均值, dBsm;

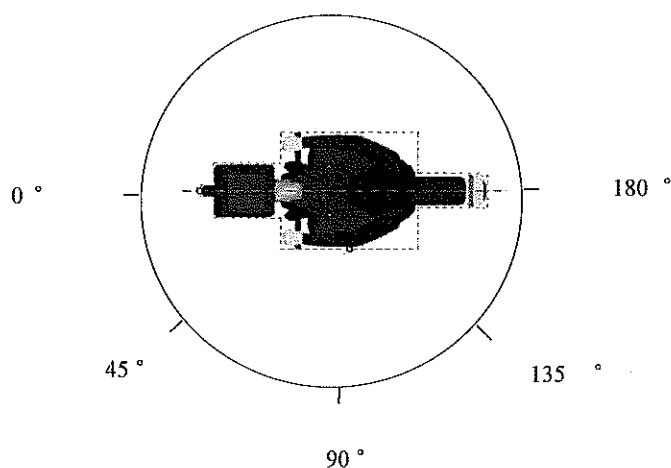


图 2 电动自行车目标物 RCS 值校准方向示意图

8 校准结果

校准结果应在校准证书上反映, 校准证书应至少包含以下信息:

- 标题: “校准证书”;
- 实验室名称和地址;
- 进行校准的地点 (如果与实验室的地址不同);
- 证书的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;

- e) 客户的地址和名称;
- f) 被校对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性应用相关时, 应对被样品的抽样程序进行说明;
- i) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

电动自行车目标物的复校时间间隔由用户根据设备使用情况确定, 建议不超过 1 年。

附录 A

原始记录参考格式

送检单位

标准器名称:

样品名称:

标准器型号规格:

样品制造厂:

标准器编号:

样品出厂编号:

标准器等级(不确定度):

样品型号规格:

依据的技术文件:

样品等级(不确定度):

标准器证书号:

校准证书编号:

原始记录编号:

样品生产日期:

年

月

日

标准器证书有效期至:

环境条件: 温度

℃

湿度

%

校准项目	原始记录及数据处理结果			
	标称值/mm	实测值/mm	绝对误差 mm	不确定度 U

红外反射率%	测量点 A	测量点 B	测量点 C	平均值
部位				

雷达反射截面积						
距离段	上限 (dBsm)	下限 (dBsm)	0° -1	0° -2	45° -1	45° -2
近段						
中段						
远段						
平均值						
距离段	上限 (dBsm)	下限 (dBsm)	90° -1	90° -2	135° -1	135° -2
近段						
中段						
远段						
平均值						
距离段	上限 (dBsm)	下限 (dBsm)	180° -1		180° -1	
近段						
中段						
远段						
平均值						

校准:

审核:

校准日期:

附录 B

校准证书内页参考格式

证 书 编 号：XXXXXX-XXXX

校准机构授权说明

校准所依据的技术文件（代号、名称）：

本次校准所使用的主要计量器具：

名 称	编 号	不确定度/准确度等级/ 最大允许误差	证书编号	证书有 效期至	溯源机 构名称

校准地点及其环境条件：

地点：

温度：

相对湿度：

其他：

证书编号: XXXXX-XXXX

校准结果

校准项目	尺寸校准结果			
	标称值/mm	实测值/mm	绝对误差 mm	不确定度 U

红外反射率校准结果		
部位	实测值/%	不确定度 U

雷达反射截面校准结果				
距离段	上限 (dBsm)	下限 (dBsm)	0°	45°
近段				
中段				
远段				
距离段	上限 (dBsm)	下限 (dBsm)	90°	135°
近段				
中段				
远段				
距离段	上限 (dBsm)	下限 (dBsm)	180°	
近段				
中段				
远段				

附录 C

校准结果不确定度评定示例

C.1 目标物外形尺寸不确定度评定

C.1.1 测量方法

目标物外形尺寸的校准是用测量仪器分别对目标物各部位的外形尺寸进行相应的测量,将被校目标物测量值与标称值进行比较,以确定外形尺寸是否满足要求。

C.1.2 数学模型

$$\Delta_i = m_i - x_i \quad (\text{C.1})$$

式中:

Δ_i ——第*i*个特征尺寸的误差, mm;

x_i ——第*i*个特征尺寸的测量值, mm;

m_i ——第*i*个特征尺寸的标称值, mm。

因为各输入量彼此独立, 依不确定度传播定律:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{C.2})$$

式中, m_i 为常数, 故:

$$u(\Delta_i) = u(x_i) \quad (\text{C.3})$$

式中:

$u(\Delta_i)$ —尺寸测量误差的不确定度;

$u(x_i)$ —尺寸测量的不确定度分量。

c_i —灵敏系数

C.1.3 标准不确定度评定

C.1.3.1 由测量重复性引入的标准不确定度 $u_a(x_i)$:

选取车身总高度为校准点, 在重复测量条件下, 对该目标物最大长度分别进行 10 次等精度测量, 数据见表 A.1, 用贝塞尔公式计算各校准点的实验标准差:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{C.4})$$

表 C.1 被校目标物外形尺寸尺寸重复性测量数据

单位: mm

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
1572	1574	1571	1576	1573	1579	1573	1573	1579	1571	1574.1

实际校准中, 以 3 次测量结果的算术平均值为测量结果, 其标准不确定度:

$$u_a(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{3}} = \frac{2.96\text{mm}}{\sqrt{3}} = 1.71\text{mm}$$

C.1.3.2 由钢卷尺分辨力引入的标准不确定度 $u_1(x_i)$:

钢卷尺显示分辨力为 1mm, 服从均匀分布, 则标准不确定度:

$$u_1(x_i) = \frac{1\text{mm}}{2\sqrt{3}} = 0.28\text{mm}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度。

B.3.3 由标准器引入的标准不确定度 $u_2(x_i)$:

钢卷尺由上级计量单位校准, 符合 II 级要求, 其最大允许误差为 $\pm 0.6\text{mm}$, 服从均匀分布, 其标准不确定度:

$$u_2(x_i) = \frac{0.6\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.35\text{mm}$$

C.1.4 标准不确定度一览表

表 C.2 标准不确定度一览表

序号	输入量估计值的标准不确定度评定			输出量估计值的不确定度分量		
	来源	符号	数值	符号	灵敏系数 c_1	$ c_1 \times u(x)$
1	重复性	$u_a(x_i)$	0.99mm	u_a	1	1.71mm
2	标准器	$u_2(x_i)$	0.35mm	u_2	1	0.35mm

C.1.5 合成标准不确定度的评定

由于各不确定度分量互不相关, 故合成标准不确定度:

$$u_c(\Delta_i) = \sqrt{u_a^2 + u_2^2} = \sqrt{1.71\text{mm}^2 + 0.12\text{mm}^2} = 1.7\text{mm}$$

C.1.6 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$, 故扩展不确定度:

$$U = k \cdot u_c(\Delta_i) = 2 \times 1.7\text{mm} = 3.4\text{mm}$$

C.1.7 测量不确定度结果

上述分析及计算得到目标物外形的尺寸示值误差测量结果的扩展不确定度：

$$U=3.4\text{mm} , k=2,$$

C.2 目标物红外反射率测量不确定度评定

C.2.1 测量方法

目标物红外反射率的校准是用光谱仪对目标物表面特征部位的反射率进行测量，其测量原理是将光谱漫反射率为 100%的理想白色表面的反射率定义为 100%，漫反射率为 0 的绝对黑表面的反射率定义为 0，反射率为无量纲的量。光谱仪的测量原理是利用光电积分法，将被测样品表面反射的辐亮度与同一辐照条件下反射比标准板反射的辐亮度相比，其信号经放大、数模转换、数据处理，最后显示出反射率值。

C.2.2 数学模型

$$IR = \bar{x} \quad (C.5)$$

式中：

IR——被校 VT 表面某特征部位的反射率，%

$\bar{x}$ ——被校 VT 表面同一特征部位反射率 3 次测量平均值，%。

依不确定度传播定律：

$$u(IR) = u(\bar{x}) \quad (C.6)$$

式中：

$u(IR)$ ——反射率测量结果的不确定度；

$u(\bar{x})$ ——光谱仪反射率测量平均值的不确定度。

C.2.3 标准不确定度评定

C.2.3.1 由测量重复性引入的标准不确定度 $u_a(\bar{x})$ ：

选取电动自行车目标物灰白色车身为校准点，在重复测量条件下，对该目标物反射率校准点进行 10 次等精度测量，数据见表 C.1，用贝塞尔公式计算各校准点的实验标准差：

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (C.7)$$

表 C.3 被校目标物反射率重复性测量数据

单位: %

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
57.1	55.6	56.6	57.4	53.2	54.6	56.8	53.8	55.6	54.8	55.6

实际校准中, 以 3 次测量结果的算术平均值为测量结果, 其标准不确定度:

$$u_a(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{3}} = \frac{1.44\%}{\sqrt{3}} = 0.83\%$$

C.2.3.2 由光谱仪显示分辨力引入的标准不确定度 $u_1(x)$:

光谱仪测量反射率显示分辨力为 0.1%, 服从均匀分布, 则标准不确定度:

$$u_1(x) = \frac{0.1\%}{2\sqrt{3}} = 0.03\%$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度。

C.2.3.3 由光谱仪引入的标准不确定度 $u_2(x)$:

光谱仪由上级计量单位校准, 其最大允许误差为 $\pm 3\%$, 服从均匀分布, 其标准不确定度:

$$u_2(x) = \frac{3\%}{\sqrt{3}} = 1.73\%$$

B.2.3.4 由反射比标准板引入的标准不确定度 $u_3(x)$:

反射比标准板由上级计量单位校准, 其在 (800-950) nm 波长范围内的反射率在 98%—99% 之间, 可以认为由漫反射标准白板的最大误差为 2%, 服从均匀分布, 其标准不确定度:

$$u_3(x) = \frac{2\%}{\sqrt{3}} \approx 1.15\%$$

C.2.3.5 标准不确定度一览表

表 C.4 标准不确定度一览表

序号	输入量估计值的标准不确定度评定			输出量估计值的不确定度分量		
	来源	符号	数值	符号	灵敏系数 c_1	$ c_1 \times u(x)$
1	重复性	$u_a(\bar{x})$	0.83%	u_a	1	0.83%
2	光谱仪	$u_2(x)$	1.73%	u_2	1	1.73%

3	标准白板	$u_3(x)$	1.15%	u_3	1	1.15%
---	------	----------	-------	-------	---	-------

C.2.4 合成标准不确定度的评定

由于各不确定度分量互不相关, 故合成标准不确定度:

$$u_c(\Delta_i) = \sqrt{u_a^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.83\%^2 + 1.73\%^2 + 1.15\%^2} = 2.24\%$$

C.2.5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$, 故扩展不确定度:

$$U = k \cdot u_c(\Delta_i) = 2 \times 2.24\% = 4.5\%$$

C.2.6 测量不确定度报告

上述分析及计算得到目标物反射率示值误差测量结果的扩展不确定度:

$$U=4.5\%, \quad k=2$$

C.3 雷达散射截面(RCS)测量不确定度评定报告

C.3.1 测量方法

雷达散射截面(RCS)的测量是首先用标准角反射器对雷达进行校准, 并得到修正系数 A , 然后再用雷达测量目标物的 RCS, 经过修正后的值作为目标物 RCS 的测量结果。

C.3.2 数学模型

$$RCS_i = rcs_i + A \quad (C.8)$$

式中:

RCS_i ——第 i 距离段目标物的 RCS 校准结果, dBsm;

rcs_i ——雷达在第 i 距离段测得目标物的 RCS, dBsm;

A ——雷达传感器的修正系数, dBsm。

由式 (3) 和式 (4), 可得

$$RCS_i = (r_{i1} + r_{i2})/2 + RCS_B - (r_1 + r_2)/2 \quad (C.9)$$

整理得

$$RCS_i = \bar{r}_i + RCS_B - \bar{r} \quad (C.10)$$

各输入量中, RCS_B 为标准角反射器的标称 RCS 值, 与其他输入量不相关, $\bar{r}_i$ 与 $\bar{r}$ 皆是雷达直接测量值, 认为强相关, 依不确定度传播定律:

$$u_c^2(RCS_i) = c_1^2 u^2(\bar{r}_i) + c_2^2 u^2(RCS_B) + c_3^2 u^2(\bar{r}) + 2c_1 c_3 r(\bar{r}_i, \bar{r}) u(\bar{r}_i) u(\bar{r}) \quad (C.11)$$

式中:

$u_c(RCS_i)$ ——第 i 距离段目标物的 RCS 校准结果的不确定度, dBsm;

$u(\bar{r}_i)$ ——雷达在第 i 距离段测得目标物 RCS 的不确定度, dBsm;

$u(RCS_B)$ ——标准角反射器的标称 RCS 值的不确定度, dBsm;

$u(\bar{r})$ ——雷达测得角反射器 RCS 中位值的不确定度, dBsm;

$r(\bar{r}_i, \bar{r})$ —— $\bar{r}_i$ 与 $\bar{r}$ 的相关系数, 认为强正相关, 取值为 1。

灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial RCS_i}{\partial \bar{r}_i} = 1 \quad (C.12)$$

$$c_2 = \frac{\partial RCS_i}{\partial RCS_B} = 1 \quad (C.13)$$

$$c_3 = \frac{\partial RCS_i}{\partial \bar{r}} = -1 \quad (C.14)$$

将灵敏系数代入式 (4) 得:

$$u_c^2(RCS_i) = u^2(\bar{r}_i) + u^2(RCS_B) + u^2(\bar{r}) - 2u(\bar{r}_i)u(\bar{r}) \quad (C.15)$$

C.3.3 标准不确定度评定

C.3.3.1 由雷达在第 i 距离段测量目标物 RCS 重复性引入的标准不确定度 $u_a(\bar{r}_i)$:

选取 (5—34) m 距离段, 对目标物进行测量, 在重复测量条件下, 进行 10 次等精度测量, 数据见表 D.1, 用贝塞尔公式计算各校准点的实验标准差:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (C.16)$$

表 C.5 角反射器 RCS 重复性测量数据

单位: dBsm

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
24.5	20.5	27.5	23.0	22.5	26.5	27.0	28.0	25.5	26.0	25.1

实际校准中, 以 2 次测量结果的算术平均值为测量结果, 其标准不确定度:

$$u_a(\bar{r}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{2}} = 1.72 \text{ dBsm}$$

C.3.3.2 由雷达测量 RCS 分辨力引入的标准不确定度 $u_1(r)$:

雷达测量 RCS 的分辨力为 0.5dBsm, 服从均匀分布, 则标准不确定度:

$$u_2(x_i) = \frac{0.5\text{dbsm}}{2\sqrt{3}} = 0.15\text{dBsm}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度, 由雷达在第 i 距离段测得目标物 RCS 不准确引入的不确定度分量

$$u(\bar{r}_i) = 1.72\text{dBsm}$$

C.3.3.3 由标准角反射器引入的标准不确定度

标准角反射器采用三面直角反射器, 由于机械加工公差、反射表面光洁度等因素的影响, 其 RCS 也会随着测量条件的不同而发生一定的变化, 根据经验值, 当尺寸误差小于 1%, 角度公差小于 0.5° , 入射角偏差小于 2° 时, 引起的 RCS 最大变化量为 2dBsm, 服从均匀分布, 其标准不确定度:

$$u(r_{CSB}) = \frac{2\text{dBsm}}{\sqrt{3}} = 1.16\text{dBsm}$$

C.3.3.4 由雷达测量角反射器 RCS 中位值的重复性引入的标准不确定度 $u_a(\bar{r})$:

选取 (4—50) m 距离段, 对标称 RCS 为 10 dBsm 的角反射器进行测量, 在重复测量条件下, 进行 10 次等精度测量, 数据见表 D.2, 用贝塞尔公式计算各校准点的实验标准差:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{C.17})$$

表 C.6 角反射器 RCS 重复性测量数据

单位: dBsm

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
15.0	15.5	17.5	18.0	18.5	16.5	17.0	18.0	18.5.0	16.0	16.9

实际校准中, 以 2 次测量结果的算术平均值为测量结果, 其标准不确定度:

$$u_a(\bar{r}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{2}} = 0.86\text{dBsm}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度, 由雷达测量角反射器 RCS 中位值不准确引入的标准不确定分量

$$u(\bar{r}) = 0.86\text{dBsm}$$

C.3.3.5 标准不确定度一览表

C.7 标准不确定度一览表

序号	输入量估计值的标准不确定度评定		
	来源	符号	数值
1	重复性	$u(\bar{r}_i)$	1.72
2	雷达	$u(r_{CS_B})$	1.16
3	标准角反	$u(\bar{r})$	0.86

C.3.4 合成标准不确定度的评定

根据式(8)，合成标准不确定度：

$$\begin{aligned}
 u_c(RCS_i) &= \sqrt{u^2(\bar{r}_i) + u^2(RCS_B) + u^2(\bar{r}) - 2u(\bar{r}_i)u(\bar{r})} \\
 &= \sqrt{1.72^2 + 1.16^2 + 0.86^2 - 2 \times 1.72 \times 0.86} = 1.44\text{dBsm}
 \end{aligned}$$

C.3.5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$ ，故扩展不确定度：

$$U = k \cdot u_c(RCS_i) = 2 \times 1.44\text{dBsm} = 2.9\text{dBsm}$$

C.3.6 测量不确定度结果

上述分析及计算得到目标物雷达散射截面测量结果的扩展不确定度：

$$U=2.9\text{dBsm}, \quad k=2$$

