

# 相关色温偏差对反光膜逆反射测量的影响

王露婉<sup>1</sup>, 薛瑛琪<sup>1</sup>, 冷正威<sup>2</sup>, 苏文英<sup>1</sup>

(1.交通运输部公路科学研究院, 北京 101103; 2.国家道路与桥梁工程检测设备计量站, 北京 101103)

**摘要:**为分析同一光源相关色温偏差对反光膜逆反射测量结果的影响,选取白、黄、红、绿、蓝 5 种颜色的三类反光膜,在不同几何条件下,采用直接照度法测量其逆反射系数;以相关色温 2 856 K 作为试验标准工况,将该工况下测量值作为逆反射系数标准值,计算不同相关色温下不同颜色反光膜的逆反射系数相对误差、平均值和标准差。结果表明,相关色温偏离时,白色、黄色、红色三类反光膜的逆反射系数总体减小,绿色、蓝色总体增加;对于白色三类反光膜,在相关色温变化较大时逆反射测量结果总体变化较平缓,相关色温在 2 856 K 附近波动时测量结果变化较大;有色反光膜逆反射测量结果随相关色温变化的趋势可反映光源光谱分布变化趋势;相关色温变化对逆反射测量的影响总体较显著,对测量结果精度要求较高时,应保证相关色温稳定在 2 856 K 处。

**关键词:**交通工程;反光膜;逆反射;相关色温

中图分类号:U491.52

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)06-0026-06

逆反射性能是影响道路交通安全设施夜间可视性的重要属性。道路交通安全设施的逆反射测量可采用逆反射测量标准装置、便携式逆反射测量仪或车载式逆反射测量仪等实现,测量装备主要由照明光源、接收器、角度系统、光学系统等组成,其中照明光源是决定测量结果准确性和一致性的重要因素,一般使用标准 A 光源。GB/T 20146—2006《色度学用 CIE 标准照明体》规定了标准 A 光源的光谱分布要求,规定相关色温为 2 856 K,但没有规定相关色温的偏差限值。JT/T 690—2007《逆反射体光度性能测试方法》规定在暗室中使用绝对法进行逆反射测量时采用的光源应为标准 A 光源,其相关色温为  $2\,856\text{ K} \pm 20\text{ K}$ 。GB/T 26377—2010《逆反射测量仪》规定便携式逆反射测量仪的光源相关色温为  $2\,856\text{ K} \pm 50\text{ K}$ 。JJF 1796—2020《逆反射标准器校准规范》规定标准 A 光源的相关色温为  $2\,856\text{ K} \pm 50\text{ K}$ 。为探究相关色温差异对逆反射测量的影响,李奕等研制逆反射亮度系数校准装置并对测量误差影响因素进行分析,指出光源光谱成分等是逆反射测量误差的来源;杨勇等研究氙灯(相关色温 8 855 K)、卤素灯(相关色温 3 056 K)、LED 光源(相关色温 4 868 K、6 924 K)对标志逆反射系数的影响,指出单色反光膜逆反射系数受入射光源差异影响较大;徐何辰等研究光谱分布差异对光度色度的影响,指出白色逆反射器受照射光源光谱分布差异的影响

可忽略。上述研究表明光谱和相关色温差异较大的光源对单色材料逆反射测量的影响较大、对白色材料的影响较小。已有研究关注的是不同光源对逆反射测量结果的影响及不同颜色逆反射体的逆反射性能和不同光源间的关联性。由于不同光源的相关色温差异较大,卤素灯相关色温比氙灯低 5 799 K,光谱分布也大不相同,不同光源相关色温变化和同一光源相关色温变化不能一概而论。已有研究没有分析同一光源相关色温偏差对逆反射测量结果的影响,实用的研究成果也较少,影响了对交通安全设施逆反射性能的准确评价。深入分析同一光源相关色温偏差引入的不确定度对评价逆反射测量准确性具有较大的意义,能促进仪器设备科学化管理维护,优化对交通安全设施的检测养护应用。为此,本文通过相关色温偏差试验研究同一光源相关色温偏差对反光膜逆反射测量结果的影响。

## 1 相关色温偏差试验

选取白、黄、红、绿、蓝 5 种颜色的三类反光膜,采用直接照度法测量其逆反射系数,步骤如下:

(1) 调整逆反射测量标准装置的电流值,使系统的光源相关色温为 2 856 K。

(2) 依次设置观测角/入射角分别为  $0.2^\circ/-4^\circ$ 、 $0.2^\circ/15^\circ$ 、 $0.2^\circ/30^\circ$ 、 $0.5^\circ/-4^\circ$ 、 $0.5^\circ/15^\circ$ 、 $0.5^\circ/30^\circ$ 、 $1^\circ/-4^\circ$ 、 $1^\circ/15^\circ$ 、 $1^\circ/30^\circ$ ,测量被测对象,将测量结果作

为参考值。

(3) 调整电流值,使同一光源照射在被测对象表面的光斑的相关色温为 2 550~3 050 K,步进值约 50 K,分别测量不同反光膜的逆反射系数。

2 试验结果

不同相关色温下,白色、黄色、红色、绿色、蓝色三类反光膜的逆反射系数测量结果见表 1~5。

表 1 不同相关色温下白色三类反光膜的逆反射系数

色温/K	不同观测角/入射角时的逆反射系数/[cd·(lx·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]								
	0.2°/-4°	0.2°/15°	0.2°/30°	0.5°/-4°	0.5°/15°	0.5°/30°	1°/-4°	1°/15°	1°/30°
2 591	285.00	288.00	282.00	118.80	121.20	121.20	12.29	11.95	12.69
2 636	285.00	288.00	282.00	118.80	121.10	121.30	12.29	11.91	12.68
2 685	285.00	288.00	282.00	118.90	121.20	121.20	12.28	11.92	12.65
2 731	285.00	289.00	282.00	118.90	121.20	121.30	12.29	11.94	12.65
2 782	291.00	296.00	286.00	121.60	124.00	123.50	12.72	12.31	12.94
2 812	284.00	288.00	281.00	118.40	120.80	120.80	12.33	11.98	12.69
2 856	287.00	292.00	280.00	120.00	122.10	120.80	12.81	12.26	12.63
2 900	285.00	289.00	278.00	119.00	121.10	120.20	12.54	12.07	12.52
2 951	284.00	288.00	277.00	118.60	120.70	119.60	12.56	12.05	12.45
3 004	287.00	291.00	279.00	119.80	122.00	120.80	12.68	12.15	12.55
3 054	279.00	283.00	272.00	116.40	118.40	117.10	12.30	11.79	12.18

表 2 不同相关色温下黄色三类反光膜的逆反射系数

色温/K	不同观测角/入射角时的逆反射系数/[cd·(lx·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]								
	0.2°/-4°	0.2°/15°	0.2°/30°	0.5°/-4°	0.5°/15°	0.5°/30°	1°/-4°	1°/15°	1°/30°
2 587	241.00	245.00	237.00	100.10	102.70	102.40	11.45	10.85	11.72
2 604	241.00	242.00	235.00	99.20	101.90	100.70	11.60	10.98	11.69
2 653	236.00	239.00	230.00	97.40	99.70	99.00	11.37	10.74	11.39
2 704	233.00	237.00	227.00	96.30	98.50	97.90	11.25	10.63	11.30
2 756	233.00	236.00	226.00	96.50	98.60	88.60	10.84	10.27	10.88
2 812	231.00	236.00	228.00	94.90	97.50	97.30	11.10	10.58	11.32
2 836	231.00	234.00	226.00	93.80	96.20	95.80	11.08	10.50	11.27
2 855	230.00	233.00	225.00	93.40	95.80	95.50	11.02	10.44	11.25
2 875	229.00	233.00	225.00	93.20	95.50	95.30	10.99	10.41	11.23
2 907	232.00	236.00	228.00	95.40	97.80	97.60	11.11	10.53	11.35
2 957	228.00	232.00	224.00	93.80	96.20	96.00	10.91	10.34	11.17

表 3 不同相关色温下红色三类反光膜的逆反射系数

色温/K	不同观测角/入射角时的逆反射系数/[cd·(lx·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]								
	0.2°/-4°	0.2°/15°	0.2°/30°	0.5°/-4°	0.5°/15°	0.5°/30°	1°/-4°	1°/15°	1°/30°
2 587	64.50	64.80	62.20	28.03	28.34	28.20	3.67	3.39	3.49
2 604	64.50	65.20	62.40	28.19	28.45	28.26	3.75	3.44	3.57
2 653	62.60	63.10	60.40	27.18	27.44	27.19	3.62	3.30	3.40
2 704	61.00	61.50	59.00	26.50	26.82	26.54	3.54	3.23	3.33
2 756	60.30	60.80	58.00	26.23	26.52	26.20	3.55	3.20	3.29
2 812	58.90	59.50	57.80	25.40	25.75	25.73	3.39	3.15	3.28
2 836	58.70	59.10	57.10	25.13	25.43	25.27	3.39	3.12	3.25
2 855	58.30	58.70	56.90	24.94	25.24	25.19	3.34	3.11	3.22
2 875	58.00	58.40	56.30	24.82	25.07	24.93	3.34	3.08	3.20
2 907	58.50	58.90	57.00	25.32	25.55	25.48	3.34	3.10	3.23
2 957	57.40	57.80	56.00	24.84	25.10	24.99	3.28	3.04	3.16

表 4 不同相关色温下绿色三类反光膜的逆反射系数

色温/K	不同观测角/入射角时的逆反射系数/[cd·(lx·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]								
	0.2°/-4°	0.2°/15°	0.2°/30°	0.5°/-4°	0.5°/15°	0.5°/30°	1°/-4°	1°/15°	1°/30°
2 587	72.80	73.70	68.60	24.44	25.09	24.20	4.00	3.66	3.68
2 604	74.10	74.70	69.60	24.94	25.56	24.53	4.11	3.73	3.71
2 653	72.40	73.30	67.70	24.45	24.98	23.87	4.11	3.65	3.62
2 704	73.10	74.00	68.80	24.53	25.20	24.24	4.04	3.67	3.70
2 756	74.00	74.70	69.00	24.96	25.50	24.41	4.20	3.73	3.69
2 812	74.40	75.80	71.40	24.77	25.60	24.90	4.08	3.77	3.86
2 836	74.60	75.70	70.90	24.61	25.33	24.51	4.12	3.79	3.85
2 855	75.00	76.20	71.50	24.74	25.49	24.71	4.13	3.77	3.87
2 875	75.20	76.40	71.60	24.81	25.56	24.77	4.15	3.79	3.88
2 907	76.60	77.70	72.90	25.62	26.37	25.54	4.20	3.84	3.93
2 957	75.90	77.10	72.70	25.34	26.13	25.44	4.14	3.81	3.93

表 5 不同相关色温下蓝色三类反光膜的逆反射系数

色温/K	不同观测角/入射角时的逆反射系数/[cd·(lx·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]								
	0.2°/-4°	0.2°/15°	0.2°/30°	0.5°/-4°	0.5°/15°	0.5°/30°	1°/-4°	1°/15°	1°/30°
2 587	29.98	30.42	27.41	9.83	10.19	9.46	1.71	1.49	1.47
2 604	30.62	31.07	27.96	10.08	10.35	9.63	1.76	1.53	1.50
2 653	30.45	30.90	27.87	10.00	10.28	9.58	1.74	1.52	1.48
2 704	30.97	31.31	28.05	10.23	10.43	9.64	1.84	1.54	1.49
2 756	31.40	31.83	28.83	10.30	10.63	9.90	1.79	1.56	1.53
2 812	32.07	32.77	29.98	10.43	10.84	10.19	1.79	1.61	1.60
2 836	32.31	32.85	29.79	10.43	10.75	10.06	1.83	1.62	1.59
2 855	32.25	32.90	30.04	10.38	10.77	10.13	1.82	1.61	1.62
2 875	32.66	33.22	30.21	10.53	10.88	10.21	1.84	1.64	1.62
2 907	33.21	33.87	30.94	10.85	11.24	10.58	1.86	1.65	1.65
2 957	32.96	33.71	31.05	10.75	11.19	10.60	1.83	1.64	1.65

3 数据分析

以标准 A 光源的相关色温 2 856 K 作为试验标准工况,将相关色温为 2 856 K 时的逆反射系数作为标准值,计算不同相关色温下逆反射系数的示值相对误差。图 1 为白色三类反光膜逆反射系数的测量误差。由表 1、图 1 可知:白色三类反光膜的逆反射系数随着相关色温的升高总体呈减小趋势。相关色温为 2 600~2 700 时白色三类反光膜逆反射系数的偏差变化较小,在 2 856 K 附近逆反射系数随相关色温变化的幅度较大。相关色温为 2 812 K 时,示值误差绝对值最大为 3.75%,最小为 1.06%;相关色温为 2 900 K 时,示值误差绝对值最大为 2.11%,最小为 0.50%。

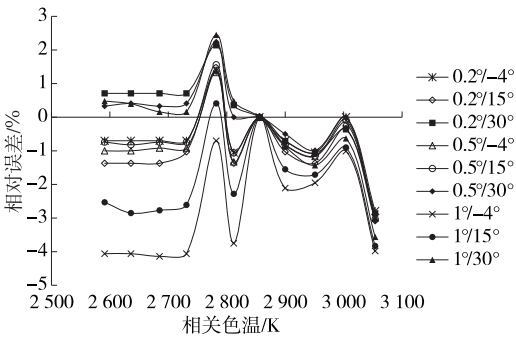


图 1 白色三类反光膜逆反射系数的测量误差

图 2 为黄色三类反光膜逆反射系数的测量误差。由表 2、图 2 可知:黄色三类反光膜的逆反射系数随着相关色温的升高总体呈减小趋势,且相对误差减小。相关色温为 2 812~2 875 K 时,黄色三类

反光膜逆反射系数的偏差总体较小,偏差的变化总体较小;在2 756 K、2 587 K附近逆反射系数随相关色温的变化幅度较大。相关色温为2 756 K时,示值误差绝对值最大为7.23%,最小为0.44%;相关色温为2 587 K时,示值误差绝对值最大为7.23%,最小为4.18%。

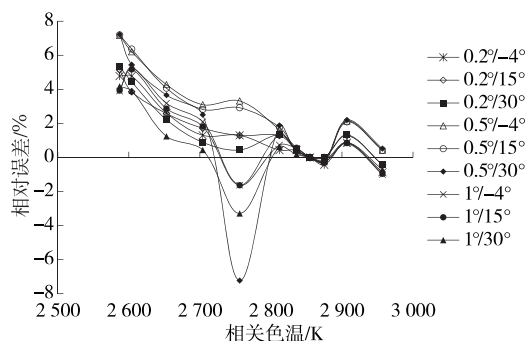


图2 黄色三类反光膜逆反射系数的测量误差

图3为红色三类反光膜逆反射系数的测量误差。由表3、图3可知:红色三类反光膜的逆反射系数随着相关色温的升高总体呈减小趋势,且相对误差减小。相关色温为2 836~2 875 K时,红色三类反光膜逆反射系数的偏差总体较小,偏差的变化总体较小。在2 604 K附近逆反射系数随相关色温的变化幅度较大,示值误差绝对值最大为13.03%,最小为9.67%;相关色温小于2 653 K时,示值误差普遍大于6.0%。

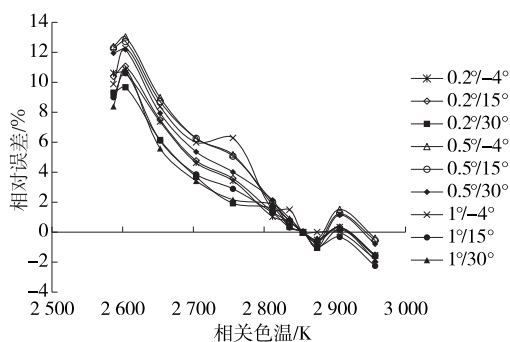


图3 红色三类反光膜逆反射系数的测量误差

图4为绿色三类反光膜逆反射系数的测量误差。由表4、图4可知:绿色三类反光膜的逆反射系数随着相关色温的升高总体呈增大趋势,且相对误差增大。相关色温为2 836~2 875 K时,绿色三类反光膜逆反射系数的偏差总体较小,偏差的变化总体较小。在相关色温为2 653 K附近逆反射系数随相关色温的变化幅度较大,示值误差绝对值最大为6.46%,最小为0.48%。

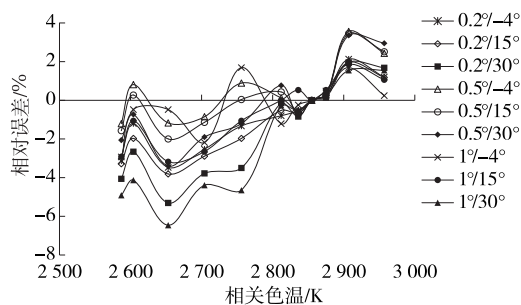


图4 绿色三类反光膜逆反射系数的测量误差

图5为蓝色三类反光膜逆反射系数的测量误差。由表5、图5可知:蓝色三类反光膜的逆反射系数随着相关色温的升高总体呈增大趋势,且相对误差增大。相关色温为2 812~2 875 K时,蓝色三类反光膜逆反射系数的偏差总体较小。在相关色温为2 600 K附近逆反射系数随相关色温的变化幅度较大,示值误差绝对值最大为9.26%,最小为2.89%。

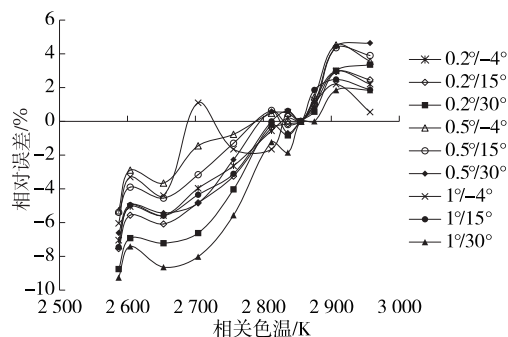


图5 蓝色三类反光膜逆反射系数的测量误差

不同颜色反光膜在不同相关色温下的逆反射系数平均值见表6,标准差见表7,偏差系数见表8。

由表6~8可知:1) 白色、黄色反光膜的逆反射系数平均值大于红色、绿色和蓝色反光膜。2) 反光膜逆反射系数标准差最大值为4.42 cd/(lx·m<sup>2</sup>),最小为0.07 cd/(lx·m<sup>2</sup>);白色、黄色反光膜的标准差较大。仅通过标准差无法准确分辨相关色温的影响。3) 对同一颜色反光膜逆反射系数的偏差系数求和,得白色反光膜的偏差系数之和为11.27%,黄色为20.24%,红色为39.48%,绿色为17.26%,蓝色为32.84%,以偏差系数衡量,逆反射测量结果受相关色温影响的排序为红色>蓝色>黄色>绿色>白色。总体上看,白色反光膜的偏差系数在1.00%左右,最大不超过2.00%,与文献[5]的结论相符;红色、蓝色、绿色、黄色反光膜的偏差系数为1.46%~4.88%,不同程度受到相关色温变化的影响,与文献[6]的结论相符。

表 6 不同颜色反光膜的逆反射系数平均值

反光膜颜色	不同观测角/入射角时逆反射系数平均值/[cd·(lx·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]								
	0.2°/-4°	0.2°/15°	0.2°/30°	0.5°/-4°	0.5°/15°	0.5°/30°	1°/-4°	1°/15°	1°/30°
白色	285.18	289.09	280.09	119.02	121.25	120.71	12.46	12.03	12.60
黄色	233.18	236.64	228.27	95.82	98.22	96.92	11.16	10.57	11.32
红色	60.25	60.71	58.46	26.05	26.34	26.18	3.47	3.20	3.31
绿色	74.37	75.39	70.43	24.84	25.53	24.65	4.12	3.75	3.79
蓝色	31.72	32.26	29.28	10.35	10.69	10.00	1.80	1.58	1.56

表 7 不同颜色反光膜的逆反射系数标准差

反光膜颜色	不同观测角/入射角时逆反射系数标准差/[cd·(lx·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]								
	0.2°/-4°	0.2°/15°	0.2°/30°	0.5°/-4°	0.5°/15°	0.5°/30°	1°/-4°	1°/15°	1°/30°
白色	2.86	3.21	3.62	1.26	1.32	1.53	0.20	0.16	0.19
黄色	4.42	4.01	4.20	2.34	2.41	3.55	0.24	0.22	0.23
红色	2.58	2.62	2.27	1.27	1.27	1.23	0.16	0.13	0.13
绿色	1.29	1.43	1.76	0.37	0.41	0.51	0.06	0.06	0.11
蓝色	1.09	1.20	1.30	0.31	0.35	0.39	0.05	0.06	0.07

表 8 不同反光膜的逆反射系数偏差系数

反光膜颜色	不同观测角/入射角时逆反射系数偏差系数/%								
	0.2°/-4°	0.2°/15°	0.2°/30°	0.5°/-4°	0.5°/15°	0.5°/30°	1°/-4°	1°/15°	1°/30°
白色	1.00	1.11	1.29	1.06	1.09	1.27	1.61	1.33	1.51
黄色	1.90	1.69	1.84	2.44	2.45	3.66	2.15	2.08	2.03
红色	4.28	4.32	3.88	4.88	4.82	4.70	4.61	4.06	3.93
绿色	1.73	1.90	2.50	1.49	1.61	2.07	1.46	1.60	2.90
蓝色	3.44	3.72	4.44	3.00	3.27	3.90	2.78	3.80	4.49

#### 4 不确定度分析

在对逆反射系数测量结果进行不确定度评定时,相关色温引入的不确定度分量常用非统计分析的方法进行 B 类评定。方法如下:根据有关信息或经验判断被测量对象的可能值区间,假设被测量值的概率分布,根据概率分布和要求的概率  $p$  确定包含因子  $k$ ,则 B 类不确定度可由下式得到:

$$u = \alpha / k$$

式中: $\alpha$  为被测量对象可能值区间的半宽度。

设概率分布为矩形分布,则  $k$  取  $\sqrt{3}$ 。对于白色三类反光膜,若相关色温偏差取 50 K,逆反射系数可能值区间的半宽度最大值为 3 cd/(lx·m<sup>2</sup>),不确定度分量最大为 1.732 cd/(lx·m<sup>2</sup>);对于黄色三类反光膜,若相关色温偏差取 50 K,逆反射系数可能值区间的半宽度最大值为 3 cd/(lx·m<sup>2</sup>),不确定度分量最大为 1.732 cd/(lx·m<sup>2</sup>);对于红色三类反光膜,若相关色温偏差取 50 K,逆反射系数可能值区

间的半宽度最大值为 0.9 cd/(lx·m<sup>2</sup>),不确定度分量最大为 0.520 cd/(lx·m<sup>2</sup>);对于绿色三类反光膜,若相关色温偏差取 50 K,逆反射系数可能值区间的半宽度最大值为 1.6 cd/(lx·m<sup>2</sup>),不确定度分量最大为 0.924 cd/(lx·m<sup>2</sup>);对于蓝色三类反光膜,若相关色温偏差取 50 K,逆反射系数可能值区间的半宽度最大值为 0.96 cd/(lx·m<sup>2</sup>),不确定度分量最大为 0.554 cd/(lx·m<sup>2</sup>)。按照不确定度分量大小排序,白色=黄色>绿色>蓝色>红色。

#### 5 结论

(1) 相关色温变化对不同颜色三类反光膜逆反射测量结果的影响不同。相关色温偏离时,白色、黄色、红色三类反光膜的逆反射系数总体减小,绿色、蓝色反光膜总体增加。红色反光膜测量结果的偏差系数总体大于 4%,约为白色反光膜测量结果偏差系数的 4 倍。

(2) 白色三类反光膜在相关色温偏离较大范围

和较小范围内受影响的规律相反。总体上看,在相关色温为 2 500~3 100 K 的较大区间内,白色三类反光膜的逆反射测量结果受相关色温偏离的影响较小;在 2 856 K $\pm$ 50 K 的较小区间内,白色三类反光膜的逆反射测量结果受相关色温偏离的影响较大。

(3) 有色反光膜逆反射测量结果随相关色温变化的趋势反映了光源光谱分布变化趋势。相关色温升高时,波长较小的分量增加,波长较大的分量减少,故黄色和红色反光膜的逆反射测量结果降低,蓝色和绿色反光膜的逆反射测量结果升高。

(4) 相关色温变化对逆反射测量的影响总体较显著。相关色温偏离的半宽度为 50 K 时,各色反光膜的逆反射系数示值误差不大于 4.5%,不确定度分量最大为 1.732 cd/(lx $\cdot$ m<sup>2</sup>)。因此,对测量结果精度要求较高时,应保证相关色温稳定在 2 856 K 处。

#### 参考文献:

- [1] 王义旭,彭璐,苗娜,等.逆反射测量装置校准中角度控制方法研究[J].中国计量,2018(11):96—98.
- [2] 王露婉,韩晓坤,何华阳,等.道路交通标线动静态测量比对研究[J].公路与汽运,2021(2):43—46.

- [3] 何华阳,苏文英,王蕊.路面平整度对标线逆反射测试的静态影响[J].中国公路学报,2022,35(5):211—220.
- [4] 李奕,周秉直,赵飞虎,等.逆反射亮度系数校准装置研制及测量误差影响因素分析[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2016,31(4):76—82.
- [5] 杨勇,张智勇,李旭,等.光源光谱对标志逆反射系数的影响[J].光谱学与光谱分析,2014,34(1):12—15.
- [6] 徐何辰,饶丰,李加,等.汽车前照灯光谱分布差异对回反射器光度色度的影响[J].照明工程学报,2016,27(2):21—24.
- [7] 罗语丹.相对测量法检测交通标志反光膜逆反射系数的可靠性分析[J].公路与汽运,2019(6):34—38.
- [8] 杨学政,滕方勇.标志反光膜逆反射性能评价方法与影响因素分析[J].山东交通科技,2020(2):106—109.
- [9] 韩飞.交通标志反光膜逆反射系数比对及能力验证结果分析[J].福建交通科技,2018(2):155—157.
- [10] 王劲惠.公路交通标志反光膜常态逆反射系数的不确定度评定[J].计量技术,2011(2):65—68.
- [11] 李伟,朱传征.逆反射测量系统计量检定技术[J].公路交通科技,2012,29(2):132—135.
- [12] 谷天明.公路标志标线的逆反射系数测量[J].交通标准化,2003(5):29—31.

收稿日期:2022—03—07

\*\*\*\*\*

(上接第 19 页)

- [11] VAN HINSBERGEN C, HEDGY A, VAN LINT J W C, et al. Bayesian neural networks for the prediction of stochastic travel times in urban networks[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2011, 5(4): 259—265.
- [12] LIANG W, LUO S, ZHAO G, et al. Predicting hard rock pillar stability using GBDT, XGBoost, and LightGBM algorithms[J]. Mathematics, 2020, 8(5): 765—781.
- [13] 王芳杰,王福建,王雨晨,等.基于 LightGBM 算法的公交行程时间预测[J].交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2): 116—121.
- [14] 韩皓,徐圣安,赵蒙.考虑线网结构的 LightGBM 轨道交通短时客流预测模型[J].铁道运输与经济, 2021, 43(10): 109—117.
- [15] 兰良,蒙祖强.基于高速公路联网收费数据的行程时间预测研究[J].信息与电脑(理论版), 2021, 33(7): 5—9.
- [16] 杨成连,文涛,李洋洋.基于 ARMAX 模型的高速公路行程时间预测研究[J].公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(4): 301—307.
- [17] 张娟,孙剑.基于 SVM 的城市快速路行程时间预测

- 研究[J].交通运输系统工程与信息, 2011, 11(2): 1009—6744.
- [18] 黄雪峰,周剑峰.高速公路车辆行程时间预测研究[J].公路, 2009(2): 116—120.
- [19] 樊博,马筱栋.基于收费数据的高速公路旅行时间预测[J].公路与汽运, 2020(6): 24—28.
- [20] 李松江,宋军芬,杨华民,等.基于聚类分析的高速公路行程时间预测[J].计算机仿真, 2019, 36(2): 384—389.
- [21] 李苗苗.不良天气下高速公路可变限速控制研究[D].兰州:兰州交通大学, 2021.
- [22] 张腾月,翁小雄.基于收费数据的高速公路行程时间可靠性估计模型[J].广西师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(4): 70—77.
- [23] GAN M, PAN S, CHEN Y, et al. Application of the machine learning LightGBM model to the prediction of the water levels of the lower Columbia River[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(5): 496.

收稿日期:2022—04—08