

基于单因素方差分析的标线逆反射快速检测 影响因素研究

周卫¹, 廖荣², 尹海佳¹, 刘向华¹

(1.广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510699; 2.广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550)

摘要: 道路交通标线逆反射亮度系数动态快速检测中, 不同因素可能对检测结果产生影响。文中分别对环境光照强度和车辆速度因素设计 3 种水平, 采用单因素方差分析方法对标线逆反射亮度系数检测结果进行分析, 研究因素的不同水平对检测结果影响的显著性差异, 结果表明, 在 95% 置信区间内, 不同环境光照强度和车辆速度水平下标线逆反射亮度系数检测结果在统计学上无显著差异; 进行方差效应量计算, 结果显示, 对于标线逆反射亮度系数检测, 车速控制比光照强度更重要。为得到可信度更高的检测结果, 检测时车辆速度不宜太快, 建议以不超过 80 km/h 的速度平稳匀速行驶。

关键词: 交通工程; 道路交通标线; 逆反射亮度系数; 动态快速检测; 影响因素; 方差分析

中图分类号: U491.523

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0048-05

随着自动化检测技术的不断发展, 采用车载式标线逆反射测量仪进行标线逆反射亮度系数动态快速检测的方法(以下简称标线逆反射快速检测)得到应用^[1-4]。使用车载式标线逆反射测量仪进行检测的过程中, 不同因素可能对检测结果产生影响。何华阳等分析路面平整度对标线逆反射亮度系数静态检测结果的影响, 指出入射角偏差对检测结果的影响较大, 车载式标线逆反射测量仪在平整度较差路面上的抗干扰能力较强, 测量结果可信度更高^[5]。王露婉等通过现场试验验证了检测车辆加减速较大变化引起观测距离和观测角度变化对标线逆反射亮度系数检测结果的影响^[6]。Fletcher J. 等分析了逆反射测试装置温度变化与标线逆反射亮度系数检测结果的相关性^[7]。

标线逆反射快速检测是将测量仪器与检测车辆相结合, 在车辆行驶过程中按照设定频率动态扫描取点, 检测结果可能受到一些因素的影响。首先, 检测仪器的光源等光学器件会受到环境光(如日光)的影响, 须分析仪器在不同环境光照强度下的滤光性能。其次, 对于固定采样频率的测量仪, 数据采集量与车辆行驶速度密切相关, 不同测试速度会导致数据采集量差异, 进而影响检测结果。因此, 须通过现场检测, 分析各因素对逆反射亮度系数检测结果的影响程度, 得出最佳且合理的检测条件, 提升检测结

果的准确性, 并为改进测量仪器的算法和检测方法提供依据。本文通过单因素方差分析研究各因素影响下逆反射快速检测结果的差异, 分析各因素对逆反射亮度系数检测结果的影响程度, 为道路交通标线逆反射亮度系数快速检测提供参考。

1 试验方案设计

1.1 方差分析方法

方差分析适用于两个以上样本均数差别的显著性检验^[8]。本文研究的因变量为标线逆反射快速检测结果, 研究因子为可能对检测结果产生影响的因素。因变量的变异一部分来自因子不同水平的影响(组间变异), 另一部分来自误差因素的影响(组内变异)。方差分析的假定条件为正态分布、独立和方差齐性。一般认为样本数量足够, 总体近似服从正态分布; 组间为独立重复试验, 故是独立的; 保证总体方差齐性是必须的, 采用 Levene 检验进行方差齐性验证。方差分析算法如下:

(1) 假定各水平间无差异, 则需要对式(1)的假设进行检验。

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \cdots = \mu_r \quad (1)$$

(2) 在第 i 个水平下总体获得 m 个试验结果, 即:

$$y_{ij}; i = 1, 2, \cdots, r; j = 1, 2, \cdots, m$$

(3) 仅由随机误差引起的数据差异用组内偏差平方和表示,记为 S_e ,按式(2)计算。由组间水平效应不同引起的数据差异用组间偏差平方和表示,记为 S_A ,按式(3)计算。各 y_{ij} 间总差异用总偏差平方和 S_T 表示,按式(4)计算。

$$S_e = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, f_e = r(m-1) = n - r \quad (2)$$

式中: f_e 为组内偏差平方和的自由度; n 为试验总次数。

$$S_A = m \sum_{i=1}^r (\bar{y}_i - \bar{y})^2, f_A = r - 1 \quad (3)$$

式中: f_A 为组间偏差平方和的自由度。

$$S_T = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y})^2, f_T = n - 1 \quad (4)$$

式中: f_T 为总偏差平方和的自由度。

(4) 引入均方的概念,并用 F 值作为检验假设 H_0 的统计量,按式(5)计算。若将 Y 记为服从 $F(f_A, f_e)$ 的随机变量,则检验概率 $P = P(Y \geq F)$ 。在显著性水平 α 下,若 $F \geq F_{1-\alpha}(f_A, f_e)$, $P < \alpha$,则因子的各水平有显著差异,拒绝原假设;若 $F < F_{1-\alpha}(f_A, f_e)$, $P > \alpha$,则因子的各水平无显著差异。

$$F = \frac{M_{S_A}}{M_{S_e}} \quad (5)$$

式中: $M_{S_A} = S_A / f_A$; $M_{S_e} = S_e / f_e$ 。

(5) 按式(6)计算方差效应量 η^2 (单因素方差分析中 η^2 和偏 η^2 一致),进一步比较各因素间关联效应的强度。 η^2 值为 $0 \sim 1$,其值越大,则不同组别间的差异越大,研究因素对因变量越重要。

$$\eta^2 = \frac{S_A}{S_A + S_e} \quad (6)$$

1.2 试验设计与分组

对不同研究因素分别设计 3 种不同水平,试验时控制单一变量,确保同一天内完成现场测试,以减少其他变量的影响^[9]。

(1) 光照强度。确定低光照度 ($< 30\,000\text{ lx}$)、中等光照度 ($30\,000 \sim < 65\,000\text{ lx}$)、高光照度 ($65\,000 \sim \geq 100\,000\text{ lx}$) 的水平范围,每 100 m 作为一个测试单元,每个测试单元在各光照强度水平下重复试验 5 次,测试相同位置车道边缘实线,测试时车辆以 80 km/h 的速度匀速行驶。

(2) 车辆速度。确定车速水平为 40 km/h、60 km/h、80 km/h,每 100 m 作为一个测试单元,

每个测试单元在各车辆速度水平下重复试验 6 次,车辆匀速行驶,测试相同位置车道边缘实线。测试在较高环境光照度下进行。

1.3 试验准备

以广东省江罗(江门—罗定)高速公路交通标线为试验对象,标线类型为热熔型,标线干燥、无污染,长度 1 km。试验采用美国 Roadvista LaserLux G7 车载移动式逆反射系数测量仪,该测量仪采用激光光源,采集频率为 400 次/s,测量几何条件的入射角与观测角满足 ASTM E1710 和 EN 1436 的要求。

2 试验结果与分析

2.1 光照因子方差分析

不同光照度水平下各测试单元标线逆反射亮度系数检测结果的平均值见表 1、图 1。从图 1 可见不同光照度水平下标线逆反射亮度系数检测结果差异较小。

表 1 不同光照度水平下标线逆反射亮度系数检测结果

测试单元	不同光照度水平下标线逆反射 亮度系数/(mcd · m ⁻² · lx ⁻¹)		
	低光照度	中等光照度	高光照度
1	235	237	245
2	278	275	275
3	275	279	280
4	260	260	262
5	334	346	342
6	350	363	369
7	233	245	250
8	231	221	237
9	306	304	305
10	287	291	286

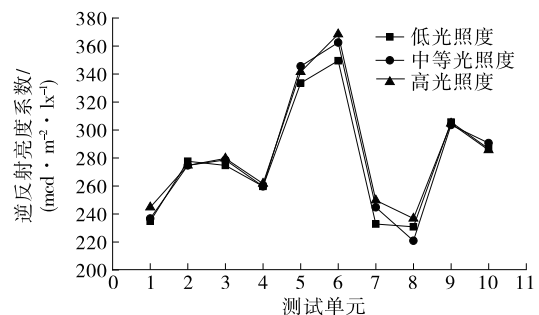


图 1 不同光照度水平下标线的逆反射亮度系数

以测量单元1(第一个100 m)为例,对检测结果进行数值特征统计,结果见表2。从表2可以看出:3种光照度水平下标线逆反射亮度系数检测结果的平均值和标准差有一定差异,这种差异可能是由各种随机误差导致的数据变化,不能断定是不是由光照度水平不同所致,须进行方差分析。方差分析结果见表3。

表2 不同光照度水平下标线逆反射亮度系数检测结果的数值特征统计

光照度水平	个案数	逆反射亮度系数/($\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$)		
		平均值	标准差	标准误差
低光照度	5	235	5.263	2.354
中等光照度	5	237	9.072	4.057
高光照度	5	245	14.687	6.568
总计	15	239	10.596	2.736

表3 光照因素下标线逆反射亮度系数检测结果的方差分析

测试单元	组间均方	组内均方	Levene 检验显著性	F 值	P 值
1	134.5	108.6	0.335	1.239	0.324
2	16.5	177.5	0.112	0.093	0.912
3	34.1	182.4	0.090	0.187	0.832
4	9.6	261.4	0.724	0.037	0.964
5	180.1	206.1	0.725	0.874	0.442
6	452.9	254.2	0.138	1.782	0.210
7	367.3	152.0	0.090	2.416	0.131
8	334.1	183.6	0.330	1.819	0.204
9	5.3	131.7	0.507	0.040	0.961
10	43.5	127.7	0.815	0.340	0.718

显著性水平取0.05。从表3可以看出:3种光照度水平下各测试单元逆反射亮度系数检测结果的Levene 检验显著性均大于0.05,表明检测结果方差齐性,总体方差无离散情况,可进行下一步方差分析;各测试单元逆反射亮度系数检测结果的显著性概率P值均大于0.05,表明在95%置信区间内,3种光照度水平对标线逆反射亮度系数检测结果的影响在统计学上无显著性差异。

2.2 车速因子方差分析

对于LaserLux G7这种固定采集频率的车载移动式逆反射系数测量仪,理论上速度为40 km/h时,纵向分辨率为2.8 cm(11.1 m/s,400次/s, $11.1/400=0.028$ m/次,每100 m共有3 600个测量数据);速度为60 km/h时,纵向分辨率为4.2 cm(16.7 m/s,400次/s, $16.7/400=0.042$ m/次,每100 m共有2 400个测量数据);速度为80 km/h时,纵向分辨率为5.5 cm(22.2 m/s,400次/s, $22.2/400=0.056$ m/次,每100 m共有1 800个测量数据)。可见,不同测试速度会导致仪器在每个测试单元内的取样位置和数据采集量存在差异。不同车速水平下标线逆反射亮度系数检测结果的平均值见表4、图2。从图2可以看出:不同车速水平下标线逆反射亮度系数检测结果总体上差别不大,但吻合程度没有不同光照度水平下检测结果好。

表4 不同速度水平下标线逆反射亮度系数检测结果

测试单元	不同速度水平(km/h)下标线逆反射亮度系数/($\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$)		
	40	60	80
1	244	237	230
2	275	275	265
3	281	278	270
4	260	260	254
5	343	345	329
6	359	363	346
7	247	245	228
8	236	223	218
9	303	305	293
10	286	292	276

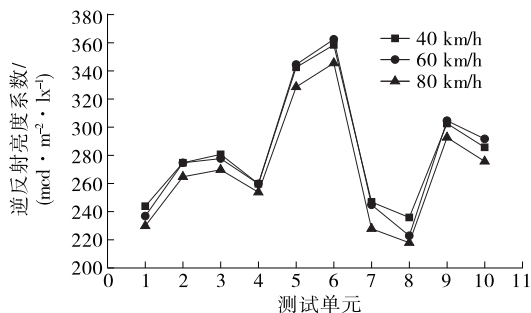


图2 不同车速水平下标线逆反射亮度系数检测结果

以测量单元1(第一个100 m)为例,对检测结果

进行数值特征统计,结果见表 5。从表 5 可以看出:3 种车速水平下标线逆反射亮度系数检测结果的平均值和标准差有一定差异,这种差异可能是由各种随机误差导致的数据变化,不能断定是不是由车速水平不同所致,须进行方差分析。方差分析结果见表 6。

表 5 不同速度水平下标线逆反射亮度系数检测结果的数值特征统计

速度水平/ (km·h ⁻¹)	个案 数	逆反射亮度系数/(mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹)		
		平均值	标准差	标准误差
80	6	244	13.348	5.449
60	6	237	8.311	3.393
40	6	230	5.050	2.062
总计	18	237	10.564	2.490

表 6 车速因素下标线逆反射亮度系数检测结果的方差分析

测试 单元	组间 均方	组内 均方	Levene 检 验显著性	F 值	P 值
1	266.7	90.9	0.252	2.934	0.084
2	200.2	180.7	0.069	1.108	0.356
3	194.0	175.5	0.546	1.105	0.357
4	56.9	175.3	0.189	0.325	0.728
5	474.4	178.7	0.713	2.655	0.103
6	473.4	158.5	0.104	2.987	0.081
7	664.2	238.1	0.791	2.790	0.093
8	531.2	184.9	0.691	2.872	0.088
9	240.7	129.2	0.486	1.863	0.189
10	405.7	123.7	0.959	3.279	0.066

从表 6 可以看出:3 种车速水平下各测试单元逆反射亮度系数检测结果的 Levene 检验显著性均大于 0.05,表明检测结果方差齐性,总体方差无离散情况,可进行下一步方差分析;各测试单元逆反射亮度系数检测结果的显著性概率 P 值均大于 0.05,表明在 95%置信区间内,3 种车速水平对逆反射亮度系数检测结果的影响在统计学上无显著性差异。

2.3 方差分析效应量计算

根据单因素方差分析结果,不同光照强度和车辆速度对标线逆反射亮度系数检测结果的影响在统

计学上均无显著性差异。但对比发现,总体上车速因素下逆反射亮度系数检测结果的 P 值比光照度因素下逆反射亮度系数检测结果的 P 值小,车速因素下逆反射亮度系数检测结果的组间均方比光照度因素下逆反射亮度系数检测结果的组间均方大,表明其组间效应差异大。为此,通过计算方差效应量进一步分析二者对标线逆反射亮度系数检测结果的重要程度,效应量计算结果见表 7。

表 7 光照因素与车速因素的方差效应量计算结果

测试 单元	不同因素下方差效应量		测试 单元	不同因素下方差效应量	
	光照因素	车速因素		光照因素	车速因素
1	0.171	0.281	6	0.229	0.285
2	0.015	0.129	7	0.287	0.271
3	0.030	0.128	8	0.233	0.277
4	0.006	0.041	9	0.007	0.199
5	0.127	0.261	10	0.054	0.304
均值			0.116 0.218		

从表 7 可以看出:车速因素的效应量整体比光照因素的效应量高,对于标线逆反射亮度系数检测,车速控制比光照强度更重要。这是由于不同车速下测量仪的检测分辨率不同、数据采集量也不同,测试时应着重控制车速。

3 结论

(1) 在 95%置信区间内,不同光照度水平对标线逆反射亮度系数检测结果的影响在统计学上无显著性差异。测量仪内部光补偿系统可将外界环境光的干扰基本排除,可在各种光照强度范围内开展标线逆反射动态快速检测。

(2) 在 95%置信区间内,不同车速水平对标线逆反射亮度系数检测结果的影响在统计学上无显著性差异。但由于不同测试速度下测量仪的检测分辨率和测试数据量有一定差别,对于标线逆反射亮度系数检测,速度控制比光照强度更重要。测试速度为 80 km/h 时,测量分辨率与仪器激光扫描长度一致,测量结果能全面覆盖标线整体。为得到足够多且可信度更高的检测数据,检测车速不宜太快,建议以不超过 80 km/h 的速度平稳匀速行驶。

除光照强度和测试速度外,标线逆反射亮度系数快速检测结果可能还会受其他因素的影响,有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] CHOUBANE B, SEVEARANCE J, LEE H S, et al. Repeatability and reproducibility of mobile retroreflectivity units for measurement of pavement markings[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2337: 74—82.
- [2] BABIĆ D, FIOLIĆ M, ŽILIONIENE D, et al. Evaluation of static and dynamic method for measuring retro-reflection of road markings[J]. Gradevinar, 2017, 69(10): 907—914.
- [3] BOYLE A. The introduction and implementation of mobile retroreflectivity measurement of pavement markings in Ireland[C]//Civil Engineering Research in Ireland 2016. National University of Ireland Galway, 2016: 115—120.
- [4] 李春东, 张澄. 移动式标线检测仪在沪宁高速公路上应用实践[J]. 科技创新与应用, 2020(30): 167—168.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] FLETCHER J, PHILPOTT A, CHOUBANE B, et al. Characterization and mitigation of temperature sensitivity within mobile retroreflectometer unit[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2015: 91—102.
- [8] 魏君, 韩颖, 苏畅, 等. 基于方差分析的轮毂造型特征显著性研究[J]. 包装工程, 2022, 43(10): 115—120.
- [9] 郑昊敏, 温忠麟, 吴艳. 心理学常用效应量的选用与分析[J]. 心理科学进展, 2011, 19(12): 1868—1878.

收稿日期: 2022—12—05

(上接第 43 页)

(2) 提出“加固护栏可降低不幸卷入事故中驾乘人员伤害”的假设, 并通过再现 1 例真实事故探讨护栏加固对事故后果的影响。结果显示, 加固护栏可阻止车辆穿越且有效降低事故伤害, 能将人体头部损伤指标 $I_{HIC,36}$ 降低 40% 以上。

参考文献:

- [1] 朱芳琪, 邱泽航, 张泽旭. 基于 GIS 的高速公路交通事故时空分析系统[J]. 公路与汽运, 2023(2): 25—31+39.
- [2] 中华人民共和国国务院. 生产安全事故报告和调查处理条例: 中华人民共和国国务院令 439 号[A]. 北京: 中国法制出版社, 2007.
- [3] 焦宇, 李显, 刘琦, 等. 2005—2019 年我国重特大安全生产事故特征分析[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2875—2882.
- [4] 丁雨蕾. 重特大交通事故特征及影响因素分析[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [5] GOPALAKRISHNAN S. A public health perspective of road traffic accidents[J]. Journal of Family Medicine and Primary Care, 2012, 1(2): 144—150.
- [6] YANG J, XU G J, CAI C, et al. Crash performance evaluation of a new movable median guardrail on highways[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 459—472.
- [7] 涂晓威, 雷正保. 护栏立柱性能测试智能虚拟仪器系统的实现方法[J]. 公路与汽运, 2023(1): 37—41.
- [8] 邹铁方, 程宇峰, 刘期, 等. 一种防止车辆穿越护栏的破坏性保险装置: CN111114513A[P]. 2021—06—18.
- [9] ZOU T F, YI L, CAI M, et al. Injury source and correlation analysis of riders in car-electric bicycle accidents[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2018, 2018: 3674858—3674872.
- [10] ZHAO Y Q, ITO D, MIZUNO K. AEB effectiveness evaluation based on car-to-cyclist accident reconstructions using video of drive recorder[J]. Traffic Injury Prevention, 2019, 20(1): 100—106.
- [11] ZOU T F, CAI M, SHU X. Response surface methodology and improved interval analysis method: For analyzing uncertainty in accident reconstruction[J]. Forensic Science International, 2012, 222(1—3): 306—312.
- [12] 邹铁方, 余志, 蔡铭, 等. 基于 PC-Crash 的车—人事故再现[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 215—219.
- [13] 邹铁方, 张勇刚, 陈元新. 基于 PC-Crash 的车辆侧滑事故再现方法[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(1): 77—82.
- [14] 邹铁方, 余志, 蔡铭. 基于 PC-Crash 软件的人—车碰撞事故仿真规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(2): 54—58+177.

收稿日期: 2023—04—17