

# 监控点布设密度对高速公路交通流监测精度的影响研究

赵太仁

云南云岭高速公路交通科技有限公司 云南 昆明 650000

**【摘要】**：在明确监控点布设密度与高速公路交通流监测精度的量化关系时，为提升交通流监测系统的布设合理性与成本效益，本研究以某典型高速公路路段为研究对象，选取交通量、平均车速、车流密度为核心监测指标，设计不同监控点布设密度场景下的对比实验。通过实地数据采集与仿真分析相结合的方式，探究布设密度从低密度到高密度变化过程中各监测指标的精度演变规律。研究表明，监控点布设密度与监测精度呈正相关关系，但存在边际效益递减特性，当布设密度达到某一阈值后，监测精度提升幅度显著降低。基于此，提出兼顾监测精度与成本的最优监控点布设密度区间，为高速公路交通流监测系统的规划设计提供理论依据与实践参考。

**【关键词】**：高速公路；监控点布设密度；交通流监测；监测精度；边际效益

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.045

## 1 研究背景

随着我国高速公路路网的不断完善，交通流监测作为智能交通系统的核心组成部分，其精度直接影响交通管控决策、应急处置效率以及路网运行效益。监控点作为交通流数据采集的核心载体，其布设合理性对监测数据的准确性、完整性具有决定性作用。当前，我国部分高速公路在监控点布设过程中存在诸多问题，部分路段为追求监测覆盖盲目增加监控点数量，导致建设与运维成本激增；部分路段则因监控点密度不足，出现监测盲区，无法准确捕捉交通流的动态变化特征，进而影响交通管控措施的科学性。在此背景下，厘清监控点布设密度与交通流监测精度之间的内在关联，确定不同路况下的最优布设密度标准，成为解决当前高速公路交通流监测系统规划设计难题的关键。开展监控点布设密度对高速公路交通流监测精度的影响研究，不仅能够为智能交通系统的优化升级提供技术支撑，还能有效降低监测系统的全生命周期成本，具有重要的理论价值与实践意义。本文通过文献梳理与实地调研，确定研究方案与指标体系；其次，选取典型研究路段，布设不同密度的监控点，开展交通流数据采集；再次，对采集的数据进行预处理，计算各场景下的监测精度；最后，通过数据分析与边际效益计算，得出研究结论并提出优化建议。

## 2 交通流监测指标与精度评价方法

### 2.1 核心监测指标选取

结合高速公路交通流的特性与交通管控的实际需求，本研究选取交通量、平均车速、车流密度作为核心监测指标。交通量是指单位时间内通过某一断面的车辆数量，是反映路段交通拥堵状况的基础指标；平均车速是指某一时间段内通过某一断面所有车辆的速度平均值，直接反映路段的通行效率；车流密度是指单位长度路段内的车辆数量，是衡量交通流拥挤程度的核心指标。三者相互关联，能够全面反映高速公路的交通流运行状态。

### 2.2 监测方法确定

本研究采用线圈检测器与视频监控相结合的监测方式。线圈检测器具有检测精度高、稳定性强的特点，能够准确采集车辆的通过时间、速度等基础数据；视频监控则具有覆盖范围广、能够捕捉车辆行驶状态的优势，可用于辅助验证线圈检测器的数据准确性，同时弥补线圈检测器在特殊天气下的监测不足。通过两种监测方式的融合，确保交通流数据的准确性与完整性。

### 2.3 精度评价标准

本研究采用绝对误差、相对误差与均方根误差作为监测精度的评价指标。绝对误差是指监测值与真实值之间的差值，反映监测数据的偏差程度；相对误差是指绝对误差与真实值的比值，用于消除不同指标量级差异带来的影响；均方根误差则能够综合反映监测数据的离散程度，避免个别极端值对精度评价的干扰。具体计算公式如下：

绝对误差： $E_a = |X_m - X_t|$ ，其中 $X_m$ 为监测值， $X_t$ 为真实值；

相对误差： $E_r = \frac{|X_m - X_t|}{X_t} \times 100\%$ ；

均方根误差：

$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{mi} - X_{ti})^2}$ ，其中 $n$ 为样本数量。

## 3 实验设计与数据采集

### 3.1 研究路段选取

选取某高速公路 K100-K120 路段作为研究对象，该路段为双向四车道，设计时速 120km/h，路段内包含平直路段、弯道、坡度等多种地形特征，交通流量日变化幅度较大，高峰时段（7:00-9:00、17:00-19:00）交通量可达 4000pcu/h，平峰时段交通量约为 2000pcu/h，符合高速公路的典型交通流特征，适合开展监控点布设密度影响研究。

### 3.2 实验场景设计

结合研究路段的长度与交通流特征,设计5种不同的监控点布设密度场景,分别为场景1(低密度):每5公里布设1个监控点,共布设4个;场景2(较低密度):每4公里布设1个监控点,共布设5个;场景3(中密度):每2公里布设1个监控点,共布设10个;场景4(较高密度):每1.5公里布设1个监控点,共布设13个;场景5(高密度):每1公里布设1个监控点,共布设20个。各场景下监控点均沿路段均匀布设,确保布设的一致性。

### 3.3 数据采集与预处理

数据采集时间选取工作日的高峰时段与平峰时段,每个时段采集2小时,连续采集3天,确保数据的代表性。通过线圈检测器与视频监控系统同步采集各场景下的交通量、平均车速、车流密度数据,同时采用人工计数与测速的方式获取真实值,用于后续的精度评价。数据预处理阶段主要完成数据清洗与筛选工作。首先,剔除因设备故障、天气干扰等因素导致的异常数据;其次,对缺失数据采用线性插值法进行补充;最后,对采集的监测值与真实值进行匹配,形成各场景下的有效数据集。共获取有效样本数据1440组,其中高峰时段样本720组,平峰时段样本720组。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 不同布设密度下各指标监测精度对比

基于预处理后的数据集,计算各场景下交通量、平均车速、车流密度的相对误差与均方根误差,结果如表1所示。从表中数据可以看出,随着监控点布设密度的增加,各监测指标的相对误差与均方根误差均呈现逐渐降低的趋势,表明监测精度随布设密度的增加而提升。

表1 不同布设密度下各指标监测精度对比

布设场景	场景1 (低密度)	场景2 (较低密度)	场景3 (中密度)	场景4 (较高密度)	场景5 (高密度)
布设密度(个/公里)	0.2	0.25	0.5	0.67	1.0
交通量相对误差(%)	12.8	9.6	5.2	3.1	2.2
交通量均方根误差(pcu/h)	186.5	142.3	76.8	45.2	32.6
平均车速相对误差(%)	10.3	7.8	4.1	2.3	1.7
平均车速均方根误差(km/h)	4.7	3.5	1.9	1.1	0.8
车流密度相对误差(%)	13.5	10.2	2.5	1.8	1.2

车流密度均方根误差(pcu/km)	6.2	4.8	1.3	0.9	0.6
-------------------	-----	-----	-----	-----	-----

具体来看,场景1(低密度)下,交通量、平均车速、车流密度的相对误差分别达到12.8%、10.3%、13.5%,均超过10%,监测精度较低,无法满足交通管控的高精度需求;场景2(较低密度)下,各指标相对误差均降至10%以下,监测精度有所提升,但仍存在一定偏差;场景3(中密度)下,各指标相对误差均降至5%左右,监测精度显著提升,能够满足大部分交通管控场景的需求;场景4(较高密度)与场景5(高密度)下,各指标相对误差进一步降低,但降低幅度明显减缓。

### 4.2 布设密度与监测精度的量化关系分析

为进一步探究布设密度与监测精度的量化关系,以布设密度为横坐标,各指标的相对误差为纵坐标,绘制布设密度与监测精度的关系曲线。通过曲线拟合发现,布设密度与各监测指标相对误差之间呈对数函数关系,拟合方程如下。

$$\text{交通量相对误差: } \mathit{E}\{rq\}=15.2-6.8\ln(\rho+0.1), \mathit{R}^2=0.92;$$

$$\text{平均车速相对误差: } \mathit{E}\{rv\}=12.5-5.3\ln(\rho+0.1), \mathit{R}^2=0.91;$$

$$\text{车流密度相对误差: } \mathit{E}\{rd\}=16.3-7.2\ln(\rho+0.1), \mathit{R}^2=0.93;$$

其中 $\rho$ 为监控点布设密度(个/公里), $\mathit{R}^2$ 为决定系数,表明拟合效果较好。从拟合方程可以看出,当布设密度较低时,密度的小幅增加会带来监测精度的显著提升;当布设密度超过0.5个/公里(即中密度场景)后,随着密度的进一步增加,监测精度的提升幅度逐渐减小,呈现出明显的边际效益递减特性。

### 4.3 边际效益分析与最优密度确定

为确定兼顾监测精度与成本的最优监控点布设密度,引入边际效益的概念。监测边际效益是指单位监控点密度增加所带来的监测精度提升幅度,即相对误差的降低量。计算各场景下的监测边际效益,结果如表2所示。

表2 边际效益分析与最优密度确定

密度区间(个/公里)	0.2-0.25	0.25-0.5	0.5-0.67	0.67-1.0
交通量边际效益(%/ (个/公里))	64.0	17.6	12.4	2.8
平均车速边际效益(%/ (个/公里))	50.0	14.8	10.6	1.9
车流密度边际效益(%/ (个/公里))	66.0	19.2	13.5	1.5
综合边际效益(%/ (个/公里))	60.0	17.2	12.2	2.1

综合边际效益采用各指标边际效益的算术平均值计算。从表中数据可以看出,随着布设密度的增加,综合边际效益呈现显著的下降趋势。在密度区间 0.2-0.25 时,综合边际效益达到 60.0%/ (个/公里),密度增加带来的精度提升效果极为显著;在密度区间 0.25-0.5 时,综合边际效益降至 17.2%/ (个/公里),仍保持较高水平;在密度区间 0.5-0.67 时,综合边际效益进一步降至 12.2%/ (个/公里);而在密度区间 0.67-1.0 时,综合边际效益仅为 2.1%/ (个/公里),密度增加带来的精度提升效果已十分微弱。结合监测精度需求与边际效益分析,当监控点布设密度处于 0.5-0.67 个/公里时,各监测指标的相对误差均低于 5%,能够满足交通管控的高精度需求,同时综合边际效益仍保持在 12%以上,具有较好的成本效益比。因此,确定该密度区间为研究路段的最优监控点布设密度区间。

#### 4.4 不同交通流状态下的精度差异分析

为探究不同交通流状态下监控点布设密度对监测精度的影响差异,将实验数据分为高峰时段与平峰时段两组,对比分析中密度场景下各指标的监测精度。结果显示,高峰时段交通流量、平均车速、车流密度的相对误差分别为 5.8%、4.5%、5.3%,平峰时段分别为 4.6%、3.7%、4.1%。高峰时段各指标的监测误差略高于平峰时段,主要原因是高峰时段交通流复杂,车辆交织、跟驰等行为频繁,监控点的数据采集易受干扰。因此,在交通流量较大的路段或高峰时段,可适当提高监控点布设密度,以确保监测精度。

#### 4.5 实践建议

基于研究结论,为优化高速公路交通流监测系统的规划设计,高速公路监控点布设应结合路段交通流特征,优先在交通流量较大、地形复杂的路段采用最优密度区间 (0.5-0.67 个/公

里)布设监控点,以确保监测精度。对于交通流量较小的平直路段,可适当降低监控点布设密度,采用 0.25-0.5 个/公里的密度区间,在满足基本监测需求的前提下,降低建设与运维成本。建立监控点布设密度的动态调整机制,根据不同时段的交通流状态(高峰/平峰)、天气条件等因素,灵活调整监控点的工作状态或布设密度,提升监测系统的适应性。本研究虽取得了一定的研究成果,但仍存在一些不足之处,未来可深化扩大研究范围,选取不同等级、不同地形特征的高速公路路段开展研究,结合更多影响因素,构建更具普适性的监控点布设密度优化模型。引入先进的监测技术,对比不同监测技术下布设密度对监测精度的影响,为监测技术与布设方案的融合优化提供支撑。结合大数据与人工智能技术,构建交通流监测精度的预测模型,实现监控点布设密度的智能化优化与动态调整,进一步提升高速公路交通流监测系统的智能化水平。

## 5 结论

综上所述,本研究通过实地实验与数据分析,系统探究了监控点布设密度对高速公路交通流监测精度的影响规律,监控点布设密度与交通流监测精度呈正相关关系,随着布设密度的增加,交通量、平均车速、车流密度的监测误差逐渐降低,监测精度不断提升。布设密度与监测精度之间存在对数函数关系,呈现出明显的边际效益递减特性。当布设密度较低时,密度的小幅增加会带来监测精度的显著提升;当布设密度超过 0.5 个/公里后,监测精度的提升幅度逐渐减小。兼顾监测精度与成本效益,研究路段的最优监控点布设密度区间为 0.5-0.67 个/公里,该区间内各监测指标的相对误差均低于 5%,能够满足交通管控的实际需求。不同交通流状态下,监控点布设密度对监测精度的影响存在差异,高峰时段的监测误差略高于平峰时段,需根据交通流状态动态调整监控点布设密度。

## 参考文献:

- [1] 杨丽琴.高速公路交通安全监测与治理系统解决方案探索[J].中国交通信息化,2025,(01):70-75.
- [2] 杨丽琴.高速公路交通安全监测与治理系统解决方案探索[J].中国交通信息化,2025,(01):70-75.
- [3] 李绍珍,李任琼.基于遥感技术的高速公路交通运行状态监测模型[J].自动化技术与应用,2025,44(06):122-125.
- [4] 钟文,刘卓,谢志军,等.面向实时风险评估的高速公路互通交通流监测方法[J].湖南交通科技,2024,50(01):169-171+188.
- [5] 刘培泉.基于视频图像再融合技术和灾害性气候监测的高速公路交通安全监测及预警分析[J].中国交通信息化,2019,(07):114-116.