

路面红外测温中行车干扰信号的识别^{*}顾平月^{1,2} 行鸿彦¹ 徐明² 孙立新²

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044; 2.航天新气象科技有限公司 无锡 214127)

摘要:研究了红外遥感路温的干扰来源,分析了晴、多云和阴雨天气条件下路面红外遥感温度与行车干扰样本的特点,拟合干扰信号并分类,提出了一种基于均值-标准差作初始中心加速 K-means 聚类分离干扰信号,利用路面与车辆的温差、车辆信号的标准差和干扰信号的持续时间,识别车辆干扰、低速障碍物和环境突变的 3 种特征并保留环境突变数据,提高路面红外测温精度的方法。结果表明,该方法在晴天和多云天算对干扰信号的总体识别率为 95.6% 和 90.9%,阴雨天的识别率为 78.2%,能有效提高路面红外测温的准确度。

关键词:路面温度;红外温度;车辆干扰;K-means

中图分类号: TP274+.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Identification of interference signals in infrared
temperature measurement of pavementGu Pingyue^{1,2} Xing Hongyan¹ Xu Ming² Sun Lixin²

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Aerospace Newsky Technology Co., Ltd., Wuxi 214127, China)

Abstract: Provided a method to improve the accuracy of infrared temperature measurement on pavement by an accelerated K-means clustering separation interference signal based on the mean-standard deviation for initial central, using the temperature difference between the road surface and the vehicle, the standard deviation of the vehicle signals, and the duration of the interference signal to separate vehicle interference, low-speed obstacles, and environmental mutations data and retain environmental mutation data. The recognition rate of this method for interference signals is 95.6% on sunny days, 90.9% on cloudy days, and 78.2% on cloudy and rainy days, which effectively improves the accuracy of on-surface infrared temperature measurement on the road surface.

Keywords: pavement temperature; infrared temperature; vehicle interference; K-means

0 引 言

路面温度是公路交通气象中的一项重要指标,是判断道路表面状态的主要依据。行驶车辆的轮胎温度在夏季高温环境中显著提升,而温度是影响爆胎的最重要因素^[1];冬季冰雪环境中路面湿滑系数随近地表大气湿度的增加而降低^[2],诱发车辆失控,造成交通事故。因此,通过监测路面温度与分析路面状况,及时预警并采取应对措施,对保障公路交通安全具有重要的应用价值。

目前常用的非接触测温方法主要有红外辐射测温法和光学干涉测温法,其中,红外辐射测温法抗干扰能力较强、技术成熟度高、可靠性好^[3]。将红外辐射测温仪器用于监

测路温路况是近几年国内外的研究热点,也正逐渐成为测量路面温度的主流方法。基于光学斩波的热释电红外测温系统用于测量路面温度可达 1% 的测量精度^[4],该方法实现了路面温度的非接触式测量,避免了维护埋入式传感器需要的道路翻修工作,减少了维护成本;一种利用单热释电传感器的红外监测系统对 10、20 m 处车辆与人员的综合分类准确率达 92%^[5],该方案采用热释电工作原理对行驶车辆和行人等突变信号实现捕获和分类识别,但无法定量检测路面温度;基于热像仪检测道路状况的方案被证实在大部分气象条件下达到或优于可见光摄像系统的识别水平^[6],通过检测轮胎温度可有效提升在雪、雾等低能见度环境的车辆识别率^[7],这两份研究证明了红外遥感用于识别

收稿日期:2021-03-11

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61671248,41605121)、江苏省重点研发计划(BE2018719)、江苏省“信息与通信工程”优势学科计划(2012-37)项目资助

行驶车辆的优越性,但未分析车辆的红外干扰对路面测温精度的影响度;房国志等^[8]通过构建 3 种典型城市下垫面历史温度估算模型的研究表明,水体和草地下垫面温度估算效果优于水泥路面温度,这主要是由于水泥路面温度的变化受人类活动的影响较大,但并未指明公路行车对水泥路面温度的影响程度;梁曹佳等^[9]指出图像分析法仍需要研究如何减少照明条件的影响和环境光的干扰等问题;此外还有研究不同地表背景下车辆目标与背景红外辐射特性的差异,进而对车辆进行温控设计达到隐身效果^[10]等相关课题,但均未涉及在路温的连续监测中,如何识别由行车遮蔽目标路面造成的测量干扰,及其对路面温度测量精度的影响程度。

本文拟通过分析路面红外测温中的行车干扰信号样本,通过 K-means 算法对路温数据和干扰数据进行分类识别,实现路面温度的精确测量,为高温路面、路面凝冻等交通气象灾害预警和路况趋势预报提供准确的判断依据。

1 路面测温干扰机理

遥感式路面温度传感器通过测量物体表面的红外辐射反演温度,非侵入式测量技术有效降低了路面作业及传感器维护的成本^[11]。路面温度的变化范围通常在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,其大部分辐射光谱处于 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 大气窗口的远红外波段范围。由于与自然环境温度相似,在传感器光学视场内如存在目标以外的物体将影响辐射测温仪器的测量结果。因此在交通道路上,行驶车辆是路面红外测温的主要干扰源。

由斯忒藩-玻尔兹曼定律可知,被测物体表面发射率变化是产生红外测温偏差的重要原因;在公路气候环境中,雨、霜和冰雪是改变道路表面发射率的气象因素。积水或冰雪长时间稳定覆盖在路面上,由发射率变化产生的测量误差可在短时期视为系统误差,通过借助其他监测设备或人工识别道路表面状态,可及时调整发射率参数以消除误差。

行驶车辆对路面红外测温由 3 个动态过程的综合影响产生随机误差:前车行驶湍流影响道路表面对流的换热过程;短波辐射和大气长波辐射交织的热辐射与车辆底部或车辆投影热辐射的交替过程;轮胎与路面摩擦产生热量的升温过程^[12]。第 1 种和第 3 种过程作用于道路表面,造成路面温度随机波动,属于观测对象真实发生的特性变化,对评估路面状态具有重要价值。第 2 种由于车辆热辐射与自然热辐射交替的影响过程,会造成红外测温传感器丢失路面温度信号,是对真实观测的干扰,需要加以排除。

由车辆遮蔽程度对观测路面红外辐射影响的公式可由下式表达:

$$E = \int_{S_c} E_i S_i dS_i + \int_{(S-S_c)} E_j S_j dS_j \quad (1)$$

式中: E 为传感器接收 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段红外辐射的总功率,

单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; E_i 为车辆表面某处红外辐射功率, E_j 为车辆表面某处红外辐射功率; S_i 为进入传感器视场车辆表面某处的投影面积, S_j 为传感器视场中路面某处的投影面积,单位为 m^2 ; S_c 为进入传感器视场车辆的路面投影面积, S 为传感器视场在路面的投影面积,单位为 m^2 。在简化发射率模型条件下,假设车辆表面温度和路面温度各自呈等温分布,由斯忒藩-玻尔兹曼定律可将式(1)简化为:

$$E = \epsilon_c \sigma T_c^4 S_c + \epsilon_r \sigma T_r^4 (S - S_c) \quad (2)$$

式中: ϵ_c 为车辆表面综合发射率, ϵ_r 为路面发射率; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数; T_c 为车辆表面平均温度, T_r 为路面平均温度,单位为 K。式(2)右边第 1 项描述了遮蔽车辆贡献的辐射功率与车身综合发射率和车身平均温度相关。

2 行车干扰信号特征及拟合分类

2.1 典型环境中路面与车辆的温度特征

自然环境中行驶车辆的热辐射受多种外部因素综合影响,包括太阳辐射、大气长波辐射、地面长波辐射、温湿度、风向风速及其他气象条件、地物背景及大气传输特性等^[13]。不同环境下车辆与路面的温差受多因素组合影响存在差异。在太阳辐射强烈的夏季,行驶中的车辆受对流冷却和车内空调制冷的双重影响,车身温度通常低于路面温度;在多云寒冷的冬季,车身温度因车辆内部制热通常高于路面温度。因此提取多种环境中路面与车辆温度特征的典型值是进行数据分析工作的必要条件。

为收集温度特性样本,实地测试使用了 FS-IR 型红外下垫面温度传感器。该传感器视场角约 30° ,短期稳定性 $\pm 0.1\text{ K/h}$,典型响应时间 30 ms ,兼容 RS232/485 数字或模拟量输出。因需在传感器前端嵌入算法,为配合数据处理、存储、系统运行及通讯等系统开销,设采样速率为 10 sps ,采样频率设 100 Hz ,数据输出频率设 1 Hz ,使得传感器在任务周期的前 100 ms 完成 10 sps 采样,后 900 ms 拟处理其他任务。图 1 所示在一条三级城市道路进行实地测试的情况:该道路平均通行车速为 $20\sim 40\text{ km/h}$;用移动三脚架将红外测温仪固定在路边上方,高度约 3 m ,与路面呈 45° 夹角,视场在路面上椭圆投影的短轴约为 1.7 m (道路横向);同时使用 Ti400 型热像仪抓拍路面与车辆的热像图作参考。

表 1 所示为晴天、多云天和阴雨天 3 种典型天气现象中实测数据的统计值。3 组数据分别展示了 33 个晴天、35 个多云天和 46 个阴雨天的行车干扰样本与路面温度的平均温差及其标准差。

表 2 所示为单个采样周期内,车辆温度样本信号标准差的均值、最小值和最大值。

行车干扰信号样本需与短时相关的路面温度特征样本进行比较。通过安全车距计算模型估算^[14],在 $20\sim 40\text{ km/h}$ 车速区间内,其安全距离通常应保持在 $20\sim 40\text{ m}$,制动反

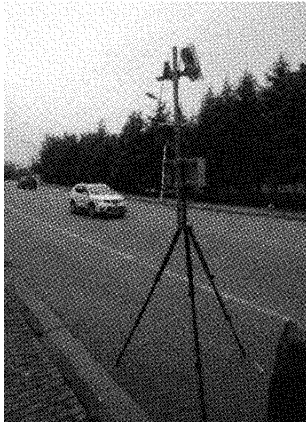


图1 路面温度测试

表1 车辆与路面温度的温差 K

天气现象	平均温差	标准差
晴	-3.48	2.50
多云	-3.17	2.11
阴雨	-0.28	0.35

表2 单个采样周期内车辆温度特征 K

天气现象	标准差均值	最小值	最大值
晴	0.54	0.01	2.57
多云	0.47	0.02	1.73
阴雨	0.04	0.01	0.13

应时间应预留 2 s 以上。因此可取干扰信号发生前 3 s,即前 3 个连续采样周期数据作为路面温度特征样本。表 3 所示为排除其他车道障碍物干扰后,与表 1 对应的 3 组路面温度特征数据。

表3 3个连续采样周期内路面温度特征 K

天气现象	标准差均值	最小值	最大值
晴	0.02	0.01	0.04
多云	0.03	0.01	0.12
阴雨	0.02	0.01	0.08

综合表 1 与 2 的数据,在阴雨天中,车辆与路面温差样本间分布与车辆温度样本内分布的离散性均显著小于晴天和多云天;晴天样本间离散性略大于多云天,样本内离散性大于多云天。数据表明在温差越大的环境中,红外传感器捕获到车辆温度信号的离散性也就越大,与环境是否平稳的相关度较小;在晴天和多云天中,同样能捕获到车辆温度波动很小的样本,这与传感器设置的采样密度高,采样时间短有关。

比较表 2 与 3,车辆温度信号在晴天和多云天的离散性显著大于路面温度,阴雨天略大;路面温度在晴天最稳定,多云天变化较快。数据表明环境状况直接影响路面温

度的稳定性,在辐射变化剧烈的多云天气中,路面温度的变化速率显著大于晴天。阴雨天受近地表对流影响存在一定的波动,但水平与晴天相当;密集雨水将加强对红外辐射的散射作用,传感器会丢失行车信号;在雨止转阴的过程中,路面与车辆的温度特征逐渐趋向多云天。在阴雨天采集的车辆温度信号接近路面温度;一些初始高热,或开启加热状态的车辆温度样本会高于路面温度。

图 2 所示为一种车辆表面温度分布相对均匀的情况,当采样周期落入车辆充满传感器视场的时间段内,所采集数据的波动会很小;在无干涉的数据采集过程中,行人或是在旁边车道行驶车辆掠过的阴影都会造成有明显温度突变,但波动很小的干扰效果。



图2 发动机盖与前挡玻璃温度相近

图 3 所示为一种由于车内制热,在低温环境中前挡风窗温度显著高于路面温度的情形。



图3 受制热影响的前挡风玻璃

2.2 车辆干扰过程中信号的近似拟合与分类

对干扰信号进行识别,判断突变原因是进行数据滤波、保障数据有效性的工作基础。在一维近似的条件下,行车遮蔽的干扰信号相对环境突变的主要区别在于车辆进入和离开传感器视场前后,车辆温度信号的持续时间与车速、传感器视场大小和车身长度相关。在一个相对稳定的环境中,通过检测信号突变的始末来估算并检验持续时间是否在合理范围内是一个重要的识别手段。

传感器在路面行车方向上视场投影的轴长为 d ,轴垂直方向投影长度为 l ,设进入视场的车身长度为 D ,车身宽度 L ,满足 $L > l$,则车身进入 d 起任意时刻 t ,车辆遮蔽的

投影面积 $S_c(t)$ 与车速 v 在轴向上的关系为:

$$S_c(t) = vlt \tag{3}$$

车辆表面温度和路面温度均匀分布的情况下, t 时刻车辆通过形成的干扰信号可根据式(2)演变为:

$$E = \epsilon_c \sigma T_c^4 vlt + \epsilon_r \sigma T_r^4 (S - vlt) \tag{4}$$

测温现场通常以单车道宽度或车辙轨迹来确定视场范围。行车方向的轴向长度 d 通常小于车身长度 D , 车辆车速在 10 km/h 以上通过传感器视场的时间一般小于 1 s, 可视作匀速掠过。因此, 式(4)在整个车辆通过过程中具有匀速上升、持稳和匀速下降的 3 个过程。图 4 所示为传感器视场内红外辐射功率 E 与时间 t 关系的整个过程。但实际情况中, 红外点测温量的视场在路面的投影通常呈圆形或椭圆形, 车辆干扰信号在 $0 \sim 0.5d/v$ 和 $(L+d)/v \sim (L+0.5d)/v$ 中加速度增大; 在 $0.5d/v \sim L/v$ 和 $(L+0.5d)/v \sim (L+d)/v$ 中加速度减小, 并因传感器响应时间特性呈抛物线特征。

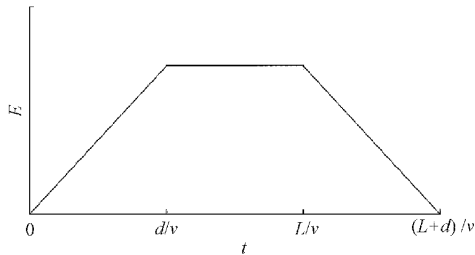


图 4 行车干扰近似过程 ($T_c > T_r$)

图 5 和 6 所示为两种典型干扰信号的实测数据, 结合两者数据显示车辆干扰的信号形态在实际测量中趋近抛物线函数。

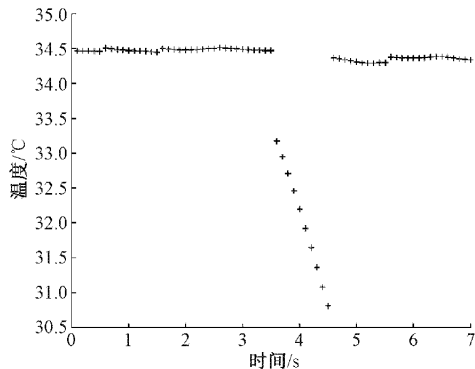


图 5 信号缓慢增强

基于时间 t 通过多阶多项式拟合原始数据获得回归曲线, 进而可解出车辆从进场到离场花费的总体时间 t_f ; 同时通过逐阶求导寻找极值或加速度拐点, 结合原始数据检验区间单调性, 可估算车辆通过视场长度 d 所花费的时间 t_d , 求得近似车速 v , 进而求得车长 L ; 对不同车种的长度和速度的合理值建模用以检验回归曲线, 同时通过原始跟随数据检验信号的时间边界, 判定本次干扰的信号类别。干扰信号分类识别的操作流程如图 7 所示。

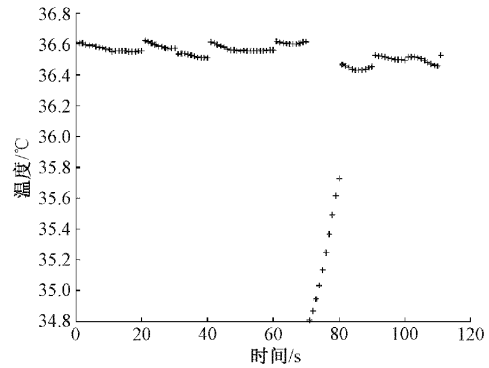


图 6 信号加速消失

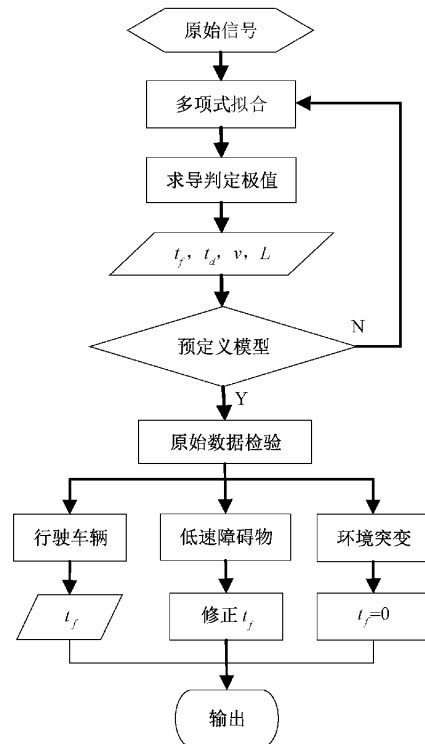


图 7 干扰信号分类识别流程

对干扰信号的识别分类的主要目的是识别并保留由环境因素导致路面温度突变的数据。这类数据对短时路面温度的变化预报具有应用价值, 对冰点温度附近的路面结冰预报更具有关键的作用^[15]。图 8 所示为一次太阳辐射快速变化引起路面温度突变的过程, 该过程持续约 10 s, 整个变化过程在 1 Hz 数据输出密度中呈现低幅、低频和平缓的特点。虽然短波辐射突然增幅, 但道路热容的体量巨大, 且道路铺设所用的混合型沥青 (1.5 w/m·k) 或混凝土 (1.7 w/m·k) 具有较高的导热系数, 在热传导和热平衡作用下, 自然环境下的路面温度很难出现大幅度的瞬时变化。

以 FS-IR 传感器在路面上行驶方向投影 1.7 m 短轴椭圆为例计算不同车身长度的车辆的通过时间, 结果如表 4 所示。

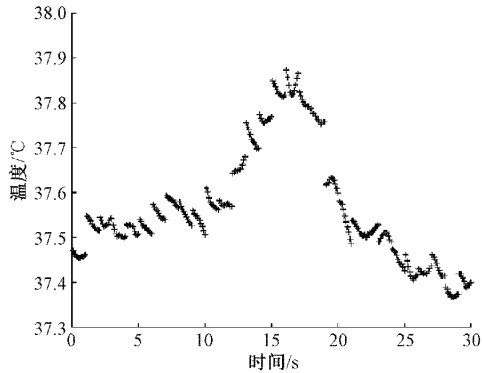


图8 路面温度瞬时变化

表4 典型车辆在红外视场的通行时间

车速/ (km·h ⁻¹)	通行时间/s			
	微型车 3.5 m	轿车 5 m	轻客 7 m	大巴 10 m
5	3.74	4.82	6.26	8.42
10	1.87	2.41	3.13	4.21
20	0.94	1.21	1.57	2.11
40	0.47	0.60	0.78	1.05
60	0.31	0.40	0.52	0.70
80	0.23	0.30	0.39	0.53
120	0.16	0.20	0.26	0.35

当前采样方案下,能被传感器连续两次捕获的行驶车辆需要维持不少于1 s,最多2 s的通过时间。该三级城市道路平均车速在20~40 km/h,主要通行车种为轿车,因此可将3.5~5 m车长、通行时间0.3~2 s作为主要类;以5 m以上车长,通行时间0.7~4.2 s作为辅助类作为检验区间建立预定义模型。

在原始数据检验过程中,以2 s作为第1时间阈值,重点检验拟合时间与实测干扰数据的时间重合度;以4 s作为第2时间阈值,辅助数据特征检查验证低速障碍;4 s时间以上的拟合样本以数据特征检查为主,验证环境突变性。

3 基于 K-means 聚类算法分离干扰信号

3.1 算法描述

路面红外温度测量中,由于行车干扰信号的发生具有随机性,在没有辅助监测设备提供标记的情况下,需结合路面与行车温度信号特征通过数据分析的方式加以分类,剔除行车干扰信号,保留真实的道面面温度数据。K-means 算法由 J. B. M 于 1967 年提出,其基本思想是在待评价对象中选取 k 个点作为聚类中心,计算剩余的样本与此 k 个点的距离,根据距离的不同确定归属于哪一类^[16]。基于均值-标准差方法确定 K-means 算法初始聚类中心既能克服 K-means 算法的不稳定,发现数据的真实分布^[17],十分适

合具有显著特征区别,又要求实时性的无监督式路面红外温度数据处理。

K-means 聚类过程如下:

输入: n 个待分类红外温度数据集 $p_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;

步骤 1):根据均值-标准差方法确定 K 个初始聚类中心集 $p_c = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$,选择最大迭代次数 I ,确定收敛条件 E ;

步骤 2):根据欧式距离公式计算每个数据到 K 个聚类中心的距离,并把数据分类到最小的聚类簇中:

$$d(x_i, c_j) = \min(x_i, \sqrt{x_i^2 - c_j^2}) \quad (5)$$

其中, $d(x_i, c_j)$ 为第 i 个红外温度数据到第 j 个聚类中心的距离, $i=1, \dots, n; j=1, \dots, k$ 。

步骤 3):重新计算 K 个聚类簇的中心值 $\{c_{1l}, c_{2l}, \dots, c_{kl}\}$,其中 l 为当前迭代次数:

$$c_{jl} = \frac{1}{n} \sum_{x_i \in p_c} (x_i, c_j) \quad (6)$$

步骤 4):检验聚类中心的收敛距离,判断操作是否结束,收敛距离公式为:

$$E_{jl} = \sqrt{c_{jl}^2 - c_{(j-1)l}^2} \quad (7)$$

若迭代次数等于 I ,则结束聚类;否则判断每个聚类中心的收敛距离 E_{jl} ,若均小于收敛条件 E ,则结束聚类,否则将本次 K 个聚类 $\{c_{1l}, c_{2l}, \dots, c_{kl}\}$ 作为新的聚类中心,返回步骤 2)继续迭代,迭代次数加 1。

3.2 基于均值-标准差选取聚类中心

由表 4 可知,在车速不低于 20 km/h 且保持车距所需制动反应时间在 2 s 以上的交通条件下,一段时间内红外测温结果以路面样本居多;比对表 1 与 3,车辆温度样本与路面温度样本具有显著区别,且在结果中呈离散分布。通过预先计算数据样本的均值及标准差,可以快速识别样本的离散程度,确定选取聚类中心的阈值范围。

假设样本均值为 μ ,标准差为 σ ,则样本主要分布区间为 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$,预设 μ 和 $\mu \pm 2\sigma$ 为路面温度数据样本聚类的中心,则 $\mu \pm 3\sigma$ 作为行车温度样本聚类中心;在一段测量时间内的可能多次发生行车干扰,因此需预设多个扩展聚类中心以匹配测量时序上离散的行车干扰信号。设 c_i 属于 K 个聚类中心集 p_c , $\mu \pm 3\sigma$ 是干扰信号搜索预设阈值,则:

$$c_i = \begin{cases} \max(x_i, x_i > \mu + 3\sigma) \\ \min(x_i, x_i < \mu - 3\sigma) \end{cases}, x_i \in (x_{jt+1}, x_{jt+i}) \quad (8)$$

式中: $j=0, 1, 2, \dots, n; x_i \in p_n; t$ 为预设单台车辆完整通过红外视场的典型时间在数据集上的跨度。

3.3 聚类样本的收敛判断

样本聚类的结果应以路面温度的测量精度需求作为主要判断依据,同时兼顾仪器稳定度与测量时间段内实际路面温度的变化情况。在道面交通气象观测系统中,通常对路面温度的测量精度为 ± 0.5 K;本次实验使用的 FS-IR 红

外温度传感器的短期稳定性为±0.1 K/h,因此处理短期数据可以忽略仪器稳定度对测量结果的影响。

利用均值-标准差方法可以获知数据的离散程度,但在较小的数据样本中受干扰信号幅值影响比较明显,因此无法通过一次聚类过程分离所有的干扰信号,尤其是幅值水平较低的干扰信号。通过分析典型天气条件下实际测量样本,发现在天气状况相对稳定的情况下,短时间内多个行车干扰样本的幅值具有同方向偏离的特性,即相比于路面温度或者均偏大,或者均偏小;路面温度随天气状况变化,尤其受辐射与阵风影响在短时间内具有波动的特性,但波动持续时间显著大于行车干扰的时间,其样本数据的分布形态接近正态分布。显然,利用均值-标准差分析的红外路面温度数据集的形态如果具有显著的单边偏离,需优先考虑存在行车干扰的情况;反之,则认为数据样本已排除干扰数据。

综合分析收敛判断条件,使用多次迭代的方法进行 K-means 聚类分析,依据待处理样本的均值-标准差判断是否收敛或继续迭代:以样本的 3σ 标准差小于路面测温精度需求作为聚类收敛的结束条件,具有最优优先级;以数据样本是否满足正态分布作为聚类收敛的判断条件,仅在不满足前述条件的情况下做二次判断,根据路面温度与车辆温度特征差异,使用特征数据给定分类样本的判定与收敛条件,基于 K-means 的干扰信号分类识别流程如图 9 所示。

具体判断过程如下:

条件 1):取样本波动特征值最大的多云天 3σ 值作为路面温度特征的收敛条件,约为±0.4 K。

条件 2):取聚类中心集 p_c 和样本均值 μ ,设聚类中心 $c \in p_c$;满足 $c \in (\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 或当 $c_a > \mu + 2\sigma$ 时,存在 $c_i < \mu - 2\sigma$ 时,作为路面特征的收敛条件。

在样本的 K-means 分类过程中对 $\mu \pm 2\sigma$ 分布以内的样本类继续执行分类直至满足任一收敛条件。

4 实验仿真与数据分析

为验证本文基于 K-means 聚类算法设计的行车干扰的有效性和适用范围,本文在三级城市道路上进行了实地测试,在夏季搜集了晴天、多云天和阴雨天 3 种典型天气下行车干扰的数据,共计 114 个样本,在配置为酷睿 i7-6567U 型 CPU、4G 内存,操作系统为 WINDOWS10 的计算机上使用 Matlab_r2015b 软件仿真算法。

对图 5~7 的数据样本使用本文算法进行识别,结果依次如图 10~12 所示。图中所示“+”、“*”、“·”和“⊙”等标识不同的数据点,是聚类结果自动标记的效果; t_f 为算法根据图 7 所示的干扰信号分类识别流程得到的结果,当 $t_f = 0$ 时,判定不存在干扰信号。结果显示,经算法处理前后,由行车干扰形成显著离散的信号被有效标识,符合人工观察的结果。

使用 MATLAB 软件仿真算法对 33 个晴天、35 个多云

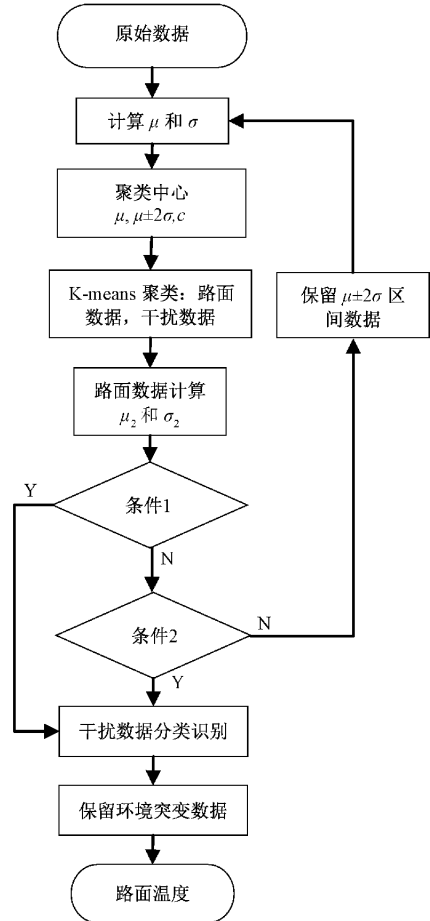


图 9 K-means 聚类识别流程

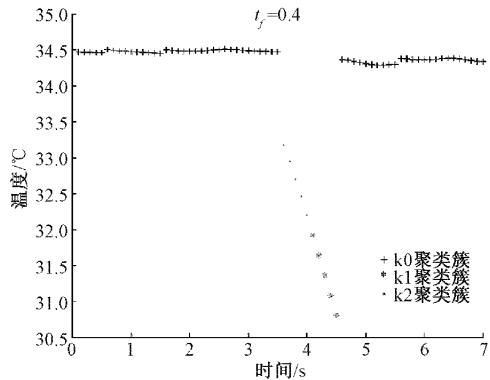


图 10 图 5 样本识别结果

天和 46 个阴雨天的行车干扰样本进行分类识别,统计结果如表 5 所示。

图 13 所示为统计夏季 3 种典型天气下,经行车干扰算法剔除干扰信号的路温均值与无修订的路温均值的对照图。结果显示,阴雨天的道面温度偏低且两种统计方法的误差很小;多云天道面温度相对离散,且两种统计方法的误差比阴雨天略大,有部分数据点误差显著;晴天道面温度整体偏高,且受行车干扰影响的道面温度整体低于剔除干扰的结果,且误差显著。

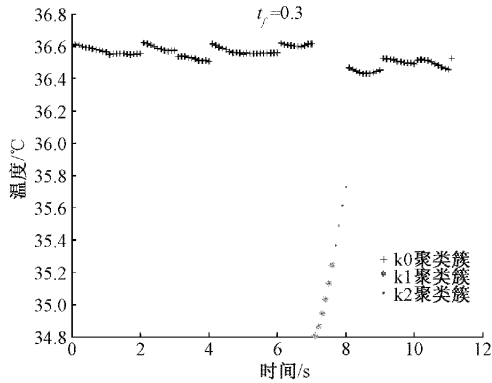


图 11 图 6 样本识别结果

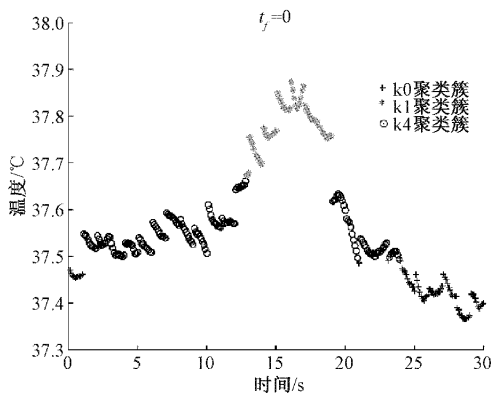


图 12 图 7 样本识别结果

表 5 仿真结果汇总

天气现象	干扰识别率/%	分类识别率/%			车速(±5 km/h)正确率/%	车长平均误差/m
		车辆	低速	环境		
晴	95.6	95.2	—	100	71.4	-1.61
多云	90.9	88.9	—	100	55.6	-1.93
阴雨	78.2	75.6	66.7	60.0	62.5	-2.25

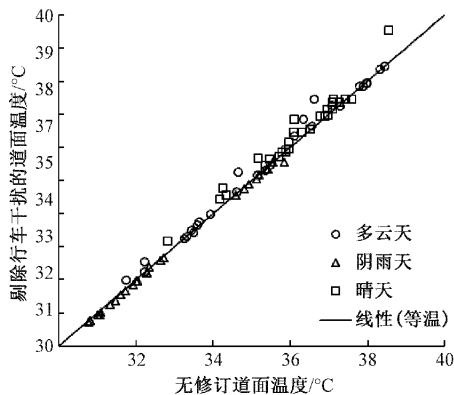


图 13 剔除行车干扰的路面温度 VS 无修订路面温度

图 14 所示为统计 3 种典型天气下,两种道面温度算法误差与交通密度(辆/公里)的对照图。实验数据表明,3 种

天气条件下两种算法结果的温差均随着交通密度的提升而增大;阴雨天整体误差最小,多云天在低交通密度下误差较小,晴天整体误差较大且离散性较大。由于试验观测是在城市三级道路上进行,因此能够获取的交通密度显著低于城市主干道的日常水平;而数据比对趋势说明在高交通密度的路况上进行道面温度监测,行车干扰对路温观测的影响已超过±0.5℃观测精度的要求,因此必须识别行车干扰信号并剔除。

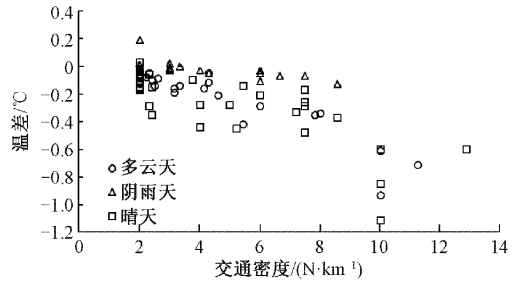


图 14 有无干扰剔除算法的温差 VS 交通密度

从统计结果看,算法在晴天和多云天条件下对干扰信号的总体识别率较为理想,能够正确识别环境突变数据并保留,均达 90%以上;阴雨天条件下干扰信号总体识别率有所下降,干扰与环境突变识别率因数据相近而显著降低,两者互有错判;车速判定的总体正确率不高,大部分发生在车辆温度数据标准差较小的情况中;车身长度误差很大,主要原因是实际行驶车辆的表面温度分布与一维近似模型存在误差,该误差在晴天条件下因车身与路面的温差增加而减小,在阴雨天气下因两者温差减小而增大。图 15 所示为在雨天条件下,有效行车信号与环境扰动幅值重叠的现象。

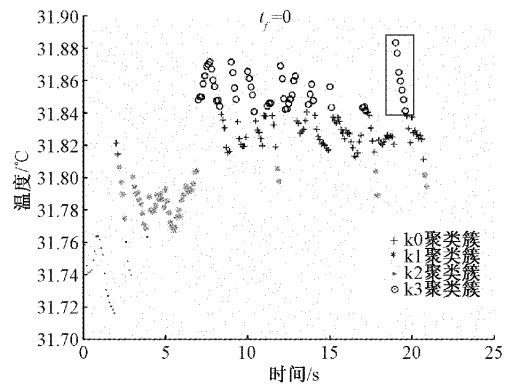


图 15 雨天车辆信号

图 16 所示为一种行车信号淹没在路面数据中,无法分辨的情况。

图 17 所示为一种因干扰信号幅值过小,未被标识的情况。

以±0.5℃误差来评估行车干扰信号对路面温度测量的影响,统计到阴雨天车辆与路面的最大温差仅为 0.28℃,阴雨天中约 80%的样本即使不进行干扰信号分类识别,半分钟温度均值也在误差范围内;在雨水密集

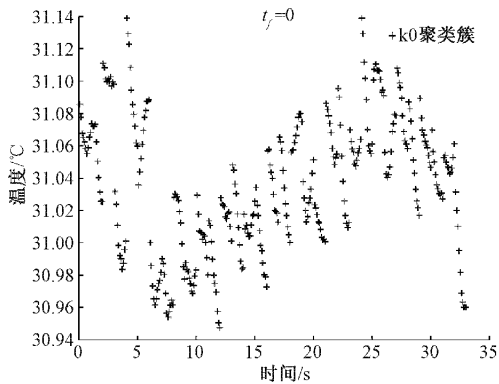


图 16 车辆信号被淹没

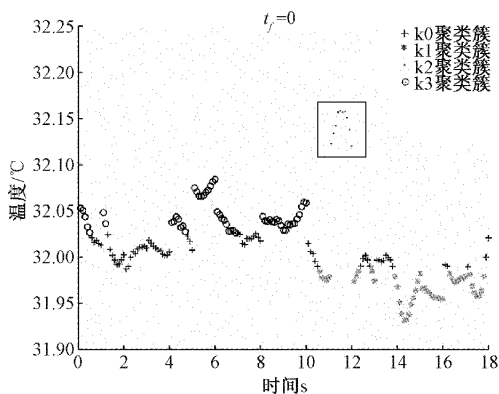


图 17 车辆信号被忽略

中,被淹没的车辆信号对测温数据的影响微乎其微。晴天和多云天滤除行车干扰信号后,显著提高交通密度达 10 辆/公里以上路况的路面温度均值,分别可达 1.16 °C 和 1.06 °C,极端样本可达 3 °C 以上。比对结果证明,利用 K-means 进行行车干扰分类识别,通过剔除干扰数据修订道面温度的方法可显著提高道面温度观测精度,尤其适用于交通密度高,车辆与真实道面温差大的晴朗和多云天路况。

本次实验过程中统计了每半分钟 300 个样本数据基于酷睿 i7-6567U 型 CPU 运行仿真算法的处理时间,结果平均约为 0.02 s,说明均值-标准差方法作为初始中心有效减少了 K-means 聚类次数,减少了程序开销,适用于嵌入式处理系统的移植。相比于为提高路面测温准确度而采用辅助手段识别并剔除干扰数据,本算法可通过植入现有的红外测温系统实现路面测温精度的实时订正,通过样本容量控制减少资源和时间的开销,具有识别率较高,针对性较强,实时性好,满足实际需求的特点。

5 结 论

本文提出了一种基于路面温度与行车温度的红外温度特征和差异,用均值-标准差作为初始中心算法的 K-means 聚类算法对行车干扰信号实现分类识别的方法。

该方法的特点是利用红外传感器采样周期内路面温度与车辆温度数据具有不同标准差的特点建立分类识别阈值,通过均值-标准差方法建立初始聚类中心加速 K-means 算法收敛;利用车身长度与车速建立预定义模型,设定视场通行时间阈值,结合原始数据拟合干扰信号数据进行分类检验;剔除行驶车辆和低速障碍干扰数据,保留环境突变数据实现路面温度的精确测量。结果表明,该方法在晴天和多云天天气条件对行车干扰信号有较高的识别率,有效提高了路面红外测温的准确度;对阴雨天条件下路面温度测量的准确度有一定的改善作用。

针对目前方法的不足,后续将从下述几个方面开展改进和验证工作:

- 1)改进 10 sps 采样策略,执行加密观测或平均分布到 1 Hz 采样周期内,捕获更完整的干扰信号以提高拟合精度,降低分类识别难度;
- 2)扩展采集和分析不同路面状况下的干扰样本,如行人干扰、有冰雪覆盖的交通状况等;
- 3)增加车速在 20 km/h 以下和 60 km/h 以上的行车干扰样本,检验并完善算法;
- 4)在不同的季节、路况和观测角度下增加外场测试密度,在实践中发现问题并解决问题。

参考文献

- [1] 田小毅,张振东,鲍婧,等. 沪宁高速公路高温爆胎阈值和爆胎风险指数的研究[J]. 灾害学,2017,32(4): 114-119.
- [2] 程国柱,莫宣艳,毛程远. 冰雪条件下城市道路交通安全评价方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2011(1):130-134.
- [3] 刘泽元,尚永红,林博颖,等. 红外测温设备的空间环境影响及防护研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(4):165-171.
- [4] 解乐,刘建国,程寅,等. 一种非接触式道面温度测量系统研制[J]. 电子技术应用,2017(6):75-78.
- [5] 李光,余振华,李宝清,等. 基于热释电红外传感器的车辆和人员分类[J]. 传感器与微系统,2014(10): 28-31.
- [6] FU T, JOSHUA S, SOHAIL Z, et al. Automatic traffic data collection under varying lighting and temperature conditions in multimodal environments: Thermal versus visible spectrum video-based systems[J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017:1-15.
- [7] IWASAKI Y, MISUMI M, NAKAMIYA T. Robust vehicle detection under various environmental conditions using an infrared thermal camera and its application to road traffic flow monitoring [J]. Sensors, 2013, 13(6):7756-7773.

- [8] 房国志,罗毅,谢文清,等. 城市空间典型下垫面温度监测与估算[J]. 仪器仪表学报,2020,41(9):161-168.
- [9] 梁曹佳,叶林,葛俊锋. 非接触式路面状态检测技术研究进展[J]. 传感器与微系统,2019,38(2):1-4,8.
- [10] 李俊山,陈霞,李建华. 不同地面背景下目标与背景红外辐射对比特性[J]. 红外与激光工程,2014,(2):424-428.
- [11] 杨品. 遥感式道面传感器交通自动气象站的发展趋势[C]. 2011年第二十八届中国气象学会年会论文集,北京市气象局,2011:1-6.
- [12] 李乃杰,李迅,董颜. 冬季车辆热源对路面温度影响的估算[J]. 干旱气象,2017(4):682-687.
- [13] 汤雨,李俊山,陈霞. 基于有限元法的运动装甲车辆温度模型分析[J]. 激光与红外,2010(9):965-969.
- [14] 张吉康. 基于相对运动理论的动态安全车距计算模型[J]. 北京汽车,2012(4):14-17.
- [15] TORBJORN G, JOERGEN B, MATS R, et al. Ice formation detection on road surfaces using infrared thermometry[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012,83/84(Dec.):71-76.
- [16] 刘宇,廉洪波,王炜. 基于改进 k-means 和 DE-ELM 的配电网负荷预测研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(5):45-49.
- [17] 谢娟英,丁丽娟. 完全自适应的谱聚类算法[J]. 电子学报,2019,47(5):1000-1008.

作者简介

顾平月,工程师,主要研究方向为光电传感器技术与应用。

E-mail:gu_pingyue@js1959.com