

基于移动监测的冬季路面温度数据处理

汤筠筠^{1,2}, 李长城³, 廖文洲³, 张表志²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;
3. 北京中交华安科技有限公司, 北京 100088)

摘要: 应用移动式交通气象环境监测系统对固定式交通气象监测站所在路段进行路面温度数据采集, 研究不同天气条件下高速公路路面温度数据时空修正处理方法, 绘制相对路面温度分布图, 掌握路段中不同位置与监测站点的相对路面温度差异, 推算得到监测站点以外同一时刻其他位置的路面温度, 实现高速公路全路段路面温度的实时监测. 提出适用于高速公路路面温度数据采集、融合处理、描述展现的流程和方法, 允许误差在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内, 准确率达到 92.31%. 可为监测高速公路长距离路段的路面温度、辨识路面低温或易于结冰区域以及提升冬季结冰风险路段的高速公路运营管理、养护决策和应急服务水平提供技术参考.

关键词: 道路工程; 路面温度; 移动监测; 高速公路; 冬季
中图分类号: U421.4 **文献标志码:** A

Processing Method of Pavement Temperature Using Mobile Monitoring in Winter

TANG Junjun^{1,2}, LI Changcheng³, LIAO Wenzhou³, ZHANG Biaozhi²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. Beijing Zhongjiao Hua'an Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to realize real-time monitoring of pavement temperature of the whole expressway, continuous pavement temperature data were collected using a mobile traffic meteorological monitoring system where was fixed a traffic meteorological station, and a temporal and spatial pavement temperature data processing method was studied under different weather conditions, and a relative pavement temperature distribution map was drawn, and the relative pavement temperature difference between different positions and the fixed traffic meteorological monitoring station were obtained, and the pavement temperature at other locations

were calculated. This paper shows a set of processes and methods for data collection, fusion processing, and descriptive presentation of pavement temperature, and the accuracy reaches 92.31% within allowable error range of $\pm 1^\circ\text{C}$. All these results are in order to monitor effectively pavement temperature of long distance, identify low temperature and easy icing sections, which will provide a strong technical support for enhancing levels of operation management, maintenance decision and emergency service of icing risk sections in winter.

Key words: road engineering; pavement temperature; mobile monitoring; expressway; winter

冬季路面结冰会大大降低路面抗滑性能, 造成行车条件恶化, 极易导致车辆侧滑、制动距离延长和失控, 从而引发交通事故和道路阻断, 给高速公路交通安全运行带来极大挑战.

路面结冰主要是因为路面低温, 当路面温度降低到一定程度(通常是 0°C 以下), 路面就有可能出现不同程度的结冰现象. 随着道路气象信息系统(RWIS)理念在中国的不断深入, 越来越多的高速公路建设了固定式交通气象监测站, 可以有效监测路面温度. 但是高速公路沿线低密度、分散建设的固定式交通气象监测站仅能对其所在位置的路面温度进行监测, 还无法实现对高速公路长距离路段进行全覆盖式监测. 目前美国、欧洲等发达国家都研发了用于车载的移动气象站, 可以移动采集气象参数, 特别是芬兰 Vaisala 公司, 研发了一系列移动气象信息系统, 可以移动监测路面温度数据. 但是这些传感器仅能实现路面温度的连续采集和展示, 并不能将所有采集的数据统一到同一时刻进行关联分析, 无法实现由有限的监测站点扩展到高速公路全路段的路面温度实时监测^[1-9].

收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2015-9009); 新疆维吾尔自治区交通运输厅科研项目

第一作者: 汤筠筠(1981—), 女, 正高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为道路安全与环境. E-mail: jj.tang@rioh.cn

因此,为了实现高速公路长距离精细化的连续路面温度监测,应用移动式交通气象环境监测系统,针对高速公路沿线固定式交通气象监测站所在路段采集的路面温度数据,研究不同天气条件下高速公路路面温度随时间和空间变化的数据处理方法,分析移动监测路段中不同位置与固定监测站点的相对路面温度差异,推算得到同一时刻路段上其他位置的路面温度。成果对于交通管理决策者在冬季实时监测长距离路段的路面温度,辨识路面低温或易于结冰区域,提前采取有针对性的冬季养护管理决策或措施都有重要意义。

1 数据采集

1.1 数据采集天气类型

路面温度差异的空间分布是由地形、海拔、路面材料以及天气条件等因素决定,对于道路固定点而言,除天气条件外,其他因素是不变的,属于系统性因素,它们决定的是路面温度变化的波峰、波谷分布特征。而天气因素不能看作是系统性因素,路面温度差异变化幅度受不同天气条件影响,通常将天气类型划分成三类:极端天气、抑制天气、中间天气^[10-11]。每种天气类型的差异特征如下。

在极端天气类型条件下,天空晴朗、无风。夜晚地面向天空中辐射的热量达到最大值,地面温度会下降较低。路面温度最低的地方易出现在地势低洼地带,而最高的地方一般出现在海拔相对较高的地点。温度变化幅度可达 $7\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

在抑制天气类型条件下,存在大量低层云并伴有中等强度以上的风,云层会吸收一些地面释放的长波辐射,并把热量反射回地面。最高气温一般出现在低地,最低气温出现在海拔稍高的地区。温度变化的幅度一般不会很明显,约 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

中间天气类型介于极端和抑制天气类型之间,存在大量中高层云(无明显风)或有微风(晴朗)。路面温度的变化幅度介于上面 2 种类型的天气之间,一般为 $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

正是由于不同天气条件下路面温度差异及其变化规律不同,因此路面温度数据采集需要在不同的天气条件下进行,以获得各种路面温度的变化模式。

1.2 数据采集方法

所使用的数据来自沈阳三环绕城高速公路,应用移动式交通气象环境监测系统,于 2014 年 12 月至 2015 年 1 月之间,在冬季 3 种不同天气类型下,

进行了 6 次路面温度数据采集,现场采集如图 1。在数据采集过程中,车辆以 $70\sim 80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度在外侧车道行驶。

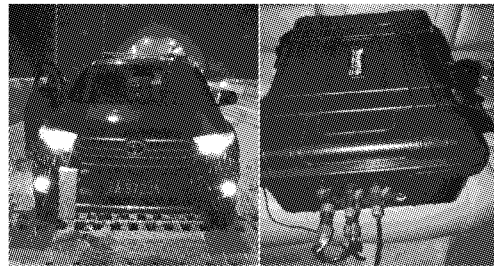


图 1 移动式交通气象环境监测系统

Fig.1 Mobile traffic meteorological monitoring system

考虑到沈阳三环绕城高速公路全长仅为 81.9 km,因此在规划数据采集单元时,将其划分为 3 个路段单元,如表 1。将第 3 个路段单元设置为重复路段(K58—K61),以便对路段单元之间的数据进行拼接整合修正。

表 1 路段单元划分

Tab.1 Road section classification

路段单元编号	起讫点位置	起讫点桩号	备注
1	下深沟立交—北李官立交	K58—K81.9(K0)	三环高速公路起点和终点重合
2	北李官立交—下深沟立交	K0—K58	
3	下深沟立交—白塔堡	K58—K61	重复路段

2 数据处理

为了实现不同路段单元路面温度数据的有效拼接,得到整条高速公路相对于某个参考点的路面温度差异分布图,以沈阳三环绕城高速公路 2014 年 12 月 29 日采集的数据为例进行分析说明,将采集到的每项原始数据按照一定的规则和步骤进行空间维和时间维的处理和修正。路面温度数据处理流程图见图 2。

2.1 路面温度原始数据

以路段单元 1(K58—K81.9)为例,移动式交通气象环境监测系统采集的原始数据信息包括:日期时间、车速、路面温度和实时记录的桩号,如表 2。可见,数据采集间隔为每秒 5 次,但是桩号信息仅在整公里桩号时通过人工打点进行输入,并未与每条数据一一对应。而且数据采集从开始到结束持续了 20 多分钟,道路和气象环境已经发生变化,因此需要将路面温度数据进行空间和时间上的处理,使所有数据与桩号一一对应,并调整到同一时刻,才能使路段中各点路面温度具有可比性。

2.2 路面温度空间修正方法

在路面温度数据从起点到终点移动采集的过程

中,通过数据采集获得的距离增量 S 应与实际里程桩号的距离增量 S' 一致,但由于高速公路里程桩号的设置会根据道路的实际情况做相应调整,对于具体的路段采集单元而言,通常 S 和 S' 会有差别. 为了保持数据的统一,对空间上采集的路面温度进行修正,以便能够与高速公路里程桩号对应.

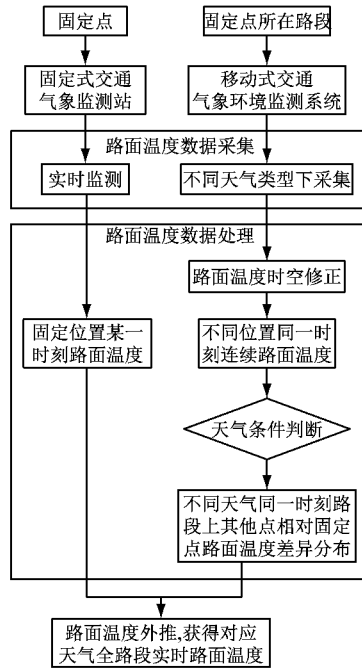


图 2 路面温度数据处理流程

Fig.2 Road surface data processing flow

表 2 路面温度原始数据

Tab.2 Original pavement temperature data

日期时间	车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	路面温 度/ $^{\circ}\text{C}$	桩号
2014.12.29 23:27:58.6	66.3	-8.3	58
2014.12.29 23:27:58.8	66.3	-8.4	
2014.12.29 23:27:59.0	66.5	-8.1	
2014.12.29 23:27:59.2	66.2	-8.0	
2014.12.29 23:27:59.4	66.4	-8.0	
2014.12.29 23:27:59.6	66.4	-8.1	
2014.12.29 23:27:59.8	66.4	-8.4	
2014.12.29 23:28:00.0	66.3	-8.3	
2014.12.29 23:28:00.2	66.3	-8.4	
2014.12.29 23:28:00.4	66.3	-8.5	
2014.12.29 23:28:00.6	66.4	-8.7	
2014.12.29 23:28:00.8	66.3	-8.0	
2014.12.29 23:28:01.0	66.3	-8.3	
2014.12.29 23:28:01.2	66.4	-8.3	
⋮	⋮	⋮	⋮
2014.12.29 23:48:47.0	72.5	-7.4	
2014.12.29 23:48:47.2	72.5	-7.3	
2014.12.29 23:48:47.4	72.5	-7.0	81.9

2.2.1 距离增量修正

在移动采集过程中,将距离增量看成是以时间为底、以速度为高的矩形. 因此,将第 i 秒采集的数

据作为一个距离增量单元 S_i , 得到每条数据的距离增量修正值 S'_i 和整个路段的累计距离增量修正值 S''_i .

$$S_i = V_i t = \frac{V_i}{3.6} \times 0.2 = \frac{V_i}{18} \quad (1)$$

$$S'_i = S_i + \frac{S_i}{S}(S' - S) \quad (2)$$

$$S''_i = \sum_{i=1}^n S'_i \quad (3)$$

式中: S_i 为每条数据对应的距离增量, m ; V_i 为车速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; t 为采集间隔, s , 因每秒采集 5 次, 因此 t 为常数 0.2; S'_i 为每条数据的距离增量修正值, m ; S 为采集数据反映的路段长度, m ; S' 为里程桩号反映的路段长度, m ; S''_i 为每条数据的累计距离增量修正值, m .

以路段单元 1 中 23:27:59.0 时刻采集的实测数据进行分析, 各条采集记录计算结果如表 3.

$$S' = 81.9 - 58.0 = 23.9(\text{km}) = 23\ 900(\text{m})$$

$$S_i = \frac{V_i}{18} = \frac{66.5}{18} \approx 3.69(\text{m})$$

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = 0 + 3.68 + 3.69 + \dots + 4.03 \approx 23\ 815(\text{m})$$

$$S'_i = S_i + \frac{S_i}{S}(S' - S) = 3.69 + 3.69 \times$$

$$(23\ 900 - 23\ 815) / 23\ 815 \approx 3.71(\text{m})$$

$$S''_i = \sum_{i=1}^n S'_i = 0 + 3.70 + 3.71 = 7.41(\text{m})$$

表 3 距离增量修正处理结果

Tab.3 Modified distance increment

日期	车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	路面温 度/ $^{\circ}\text{C}$	S_i	S'_i	S''_i
2014.12.29 23:27:58.6	66.3	-8.3	0	0	0
2014.12.29 23:27:58.8	66.3	-8.4	3.68	3.70	3.70
2014.12.29 23:27:59.0	66.5	-8.1	3.69	3.71	7.41
2014.12.29 23:27:59.2	66.2	-8.0	3.68	3.69	11.10
2014.12.29 23:27:59.4	66.4	-8.0	3.69	3.70	14.80
2014.12.29 23:27:59.6	66.4	-8.1	3.69	3.70	18.50
2014.12.29 23:27:59.8	66.4	-8.4	3.69	3.70	22.20
2014.12.29 23:28:00.0	66.3	-8.3	3.68	3.70	25.90
2014.12.29 23:28:00.2	66.3	-8.4	3.68	3.70	29.59
2014.12.29 23:28:00.4	66.3	-8.5	3.68	3.70	33.29
2014.12.29 23:28:00.6	66.4	-8.7	3.69	3.70	36.99
2014.12.29 23:28:00.8	66.3	-8.0	3.68	3.70	40.69
2014.12.29 23:28:01.0	66.3	-8.3	3.68	3.70	44.39
2014.12.29 23:28:01.2	66.4	-8.3	3.69	3.70	48.09
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2014.12.29 23:48:47.0	72.5	-7.4	4.03	4.04	23 891.92
2014.12.29 23:48:47.2	72.5	-7.3	4.03	4.04	23 895.96
2014.12.29 23:48:47.4	72.5	-7.0	4.03	4.04	23 900.00

2.2.2 路面温度与桩号匹配

按照不同的精度需求设置精度范围,采用 20 m 精度范围分析路段上路面温度差异分布情况.将表 3 中修正后的累计距离增量 S'_i 按照 $IF(MOD(S'_i, 20) \geq 10, S'_i - MOD(S'_i, 20) + 20, S'_i - MOD(S'_i, 20))$ 规则,将 20 m、40 m、60 m……前后各 10 m 范围内的距离作近似 20 m 处理(小于 10 m 记为 0),得到一系列对应的序列数据.对数据序列中相同位置桩号对应的所有路面温度数据求取平均值,即得到任意位置桩号的路面温度 T_p ,这个值代表该位置前后各 10 m 范围内的平均路面温度值.如表 4.

表 4 路面温度与桩号匹配关系

Tab.4 Matching pavement temperature with expressway stake

日期	路面温度/°C	S'_i	近似 20 m 处理	桩号	T_p
2014.12.29 23:27:58.6	-8.3	0	0	58.00	
2014.12.29 23:27:58.8	-8.4	3.70	0	58.00	-8.27
2014.12.29 23:27:59.0	-8.1	7.41	0	58.00	
2014.12.29 23:27:59.2	-8.0	11.10	20	58.02	
2014.12.29 23:27:59.4	-8.0	14.80	20	58.02	
2014.12.29 23:27:59.6	-8.1	18.50	20	58.02	-8.20
2014.12.29 23:27:59.8	-8.4	22.20	20	58.02	
2014.12.29 23:28:00.0	-8.3	25.90	20	58.02	
2014.12.29 23:28:00.2	-8.4	29.59	20	58.02	
2014.12.29 23:28:00.4	-8.5	33.29	40	58.04	
2014.12.29 23:28:00.6	-8.7	36.99	40	58.04	
2014.12.29 23:28:00.8	-8	40.69	40	58.04	-8.36
2014.12.29 23:28:01.0	-8.3	44.39	40	58.04	
2014.12.29 23:28:01.2	-8.3	48.09	40	58.04	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2014.12.29 23:48:47.0	-7.4	23 891.92	23 900	81.90	
2014.12.29 23:48:47.2	-7.3	23 895.96	23 900	81.90	-7.23
2014.12.29 23:48:47.4	-7.0	23 900.00	23 900	81.90	

2.3 路面温度时间修正方法

通常 1 s 时间内车辆行驶约 20 m,即采集相邻 20 m 间距 2 个点的路面温度值,可以视为同一时刻采集.但随着时间的推移,移动采集的路面温度在时刻变化,为了减小天气及地形变化对路面温度带来的影响,使相同天气条件下不同时间采集的路面温度数据能够整合,需要对路面温度进行时间修正,调整到“同一时刻”,这样不同点的路面温度才具有可比性,路面温度相对值才具有实际意义.

2.3.1 建立路面温度时变函数

图 3 为沈阳三环绕城高速公路东陵交通气象站冬季随机 1 天的路面温度随时间变化曲线图.可见,在同一天气条件下,路段单元内路面温度变化在时间上是同步的,路面温度在 0 至 7 点的时间段基本

处于一直缓慢下降的过程.

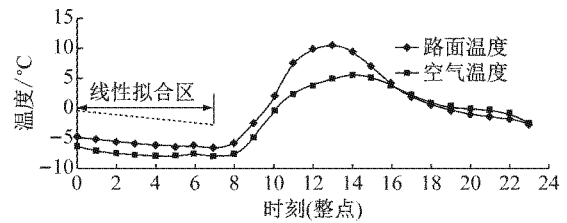


图 3 路面温度日变化

Fig.3 Daily variation of pavement temperature

因此以路面温度为因变量,以时间为自变量,绘制路面温度时变图,如图 4.图中 T_{ol1} 为开始采集时重叠路段路面温度均值,°C; T_{ol2} 为采集结束时采集的重叠路段路面温度均值,°C; ΔT_p 为路段上任意 p 点路面温度随时间变化的调整量,°C; t_s 为路段起点开始采集时间, s; t_e 为路段采集完成再次回到起点开始重叠路段采集时间, s; t_p 为路段上任一数据采集点 p 对应的的时间, s.

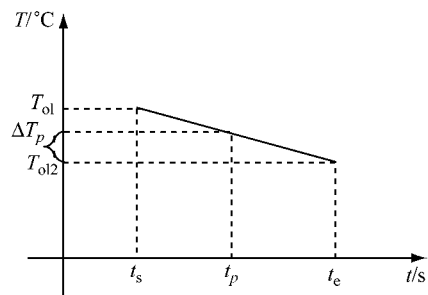


图 4 路面温度随时间变化示意

Fig.4 Pavement temperature variation with time

2.3.2 各点路面温度修正

根据图 4,为了消除选择单个路面温度记录值带来特异点偏差的影响,选择重叠路段长度范围内先后 2 次路面温度均值 T_{ol1} 和 T_{ol2} 作为参考点,计算得到路段上任意 p 点位置路面温度随时间变化的调整量 ΔT_p ,并对其路面温度 T_p 进行修正,得到修正值 T'_p .

$$\Delta T_p = \frac{T_{ol2} - T_{ol1}}{t_e - t_s} (t_e - t_p) \quad (4)$$

$$T'_p = T_p + \Delta T_p \quad (5)$$

式中: T_p 为任意位置修正前的路面温度值,°C; T'_p 为任意位置修正后的路面温度值,°C.

基于路面温度时间修正方法,以沈阳三环绕城高速公路路面温度数据为例.首先,计算重叠路段(即路段单元 3, K58—K61)采集开始和结束时的路面温度均值,得 $T_{ol1} = -8.53$ °C, $T_{ol2} = -10.04$ °C.

其次,计算路段上任意位置(p 点)路面温度随

时间变化的调整量 ΔT_p , 对路面温度 T_p 进行修正. 例如表 5 中, 东陵交通气象监测站在 K39.6 处修正后的路面温度计算过程如下:

$$\begin{aligned}\Delta T_{K39.6} &= \frac{T_{ol2} - T_{ol1}}{t_e - t_s}(t_e - t_{K39.6}) = \\ & [(-10.04) + (-8.53)] \times (1.039 - 1.015) / \\ & (1.039 - 0.978) = -0.59(^{\circ}\text{C}) \\ T'_{K39.6} &= T_{K39.6} + \Delta T_{K39.6} = (-9.10) + \\ & (-0.59) = -9.69(^{\circ}\text{C})\end{aligned}$$

同理, 计算得到路段上同一时刻任意点的路面温度修正值 T'_p , 见表 5. 其中 T''_p 为路段中任意 p 点对应参考点的相对路面温度值, $^{\circ}\text{C}$.

表 5 任意位置路面温度结果

桩号	T_p	ΔT_p	T'_p	T''_p
58.00	-8.27	-2.49	-10.76	-1.07
58.02	-8.20	-2.49	-10.69	-1.00
58.04	-8.36	-2.49	-10.85	-1.16
58.06	-8.22	-2.49	-10.71	-1.02
58.08	-8.47	-2.49	-10.96	-1.27
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
81.90	-7.23	-1.76	-8.99	0.70
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
39.60	-9.10	-0.59	-9.69	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
57.98	-8.43	-2.49	-10.92	-1.23

2.4 获取路面相对温度

选取数据采集路段上任意位置的路面温度值作为参照点, 结合路面温度数据时空修正处理结果, 推算出该路段其他位置同时刻的路面温度值.

$$T''_p = T'_p - T_a \quad (6)$$

式中: T_a 为该路段的绝对温度参考值, 即固定式交通气象站实时采集的路面温度值, $^{\circ}\text{C}$.

表 5 中, 以东陵交通气象监测站(K39.6)作为绝对温度参考值, 即 $T_a = -9.69^{\circ}\text{C}$, 则 K58 处的相对路面温度求取过程为

$$T''_{K58} = T'_{K58} - T_a = (-10.76) - (-9.69) = -1.07$$

同理, 计算得到其他点路面温度与东陵交通气象站的相对温度 T''_p , 见表 5.

3 实际天气类型验证

选择标准差 SD(standard deviation)作为描述路面温度差异程度的指标, 通常极端天气路面温度分布的 SD 最大, 抑制天气最小, 中间天气居中.

对 6 次实际采集的路面温度数据进行时空修正后, 再统计分析求出路面温度标准差, 验证数据采集

时所认定的天气条件是否符合实际情况. 表 6 为各次路面温度数据采集的判别值.

表 6 可见, 第 1 次和第 6 次天气条件下采集的数据标准差最小. 第 4 次和第 5 次天气条件下采集的数据标准差最大, 说明路面温度数据变化最显著. 第 2 次和第 3 次天气条件下采集的数据标准差介于它们之间. 可见, 判定结果与实际天气类型相符, 也与 1.1 节数据采集的 3 种典型天气类型划分依据一致.

表 6 天气类型调整

采集次数	采集日期	判定的天气类型	标准差	实际天气类型
1	2014-12-29	抑制	0.75	抑制
2	2015-01-06	中间	0.92	中间
3	2015-01-07	中间	0.99	中间
4	2015-01-09	极端	1.29	极端
5	2015-01-13	极端	1.20	极端
6	2015-01-14	抑制	0.82	抑制

4 相对路面温度分布

高速公路相对路面温度分布是指在特定的天气条件下, 同一路段某个时间点沿道路走向的不同路面温度样本点相对于某一特定点的路面温度差异的分布.

高速公路上不同点段具有相对稳定的路面温度变化趋势, 区别主要体现在不同天气条件下这种路面温度变化幅度是不同的, 其波动幅度的大小与极端、中间、抑制等不同的天气特征有关.

根据路面温度时空修正处理方法, 形成了 3 种不同天气条件下沈阳三环高速公路的相对路面温度分布图, 可以展现全路段相对路面温度高低值的变化情况, 易于辨识路段中路面低温或易于结冰的区域.

图 5 分别表示为极端天气、中间天气和抑制天气 3 种天气类型下采集的各点路面温度与东陵固定交通气象站(K39.6)的相对路面温度分布. 图中, 横坐标表示路段桩号, 纵坐标表示路段各点路面温度与参考点 K39.6 的路面温度相对值. 可见, 参考点 K39.6 的相对路面温度为 0°C , 路段 K56—K60 路面温度相对其他位置较低, 为路面低温区域, 易发路面结冰现象. 通过实际调研, 该路段高架桥涵多, 秋冬季路面积雪结冰情况时有发生, 且临河、跨河, 由浑河横穿, 易出现局地性低能见度的大雾, 在夜间气温较低时, 易凝结成冰霜, 与分析结果一致.

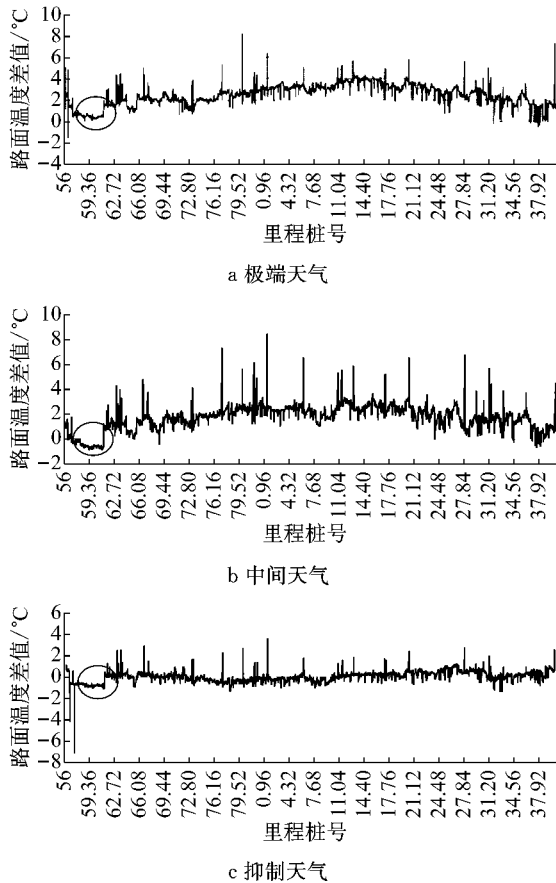


图 5 不同天气下不同位置东陵交通气象站相对路面温度分布
Fig.5 Relative pavement temperature between different points and Dongling traffic weather station under different weather types

由图 5 也可以看出,极端天气条件下路段上各点相对路面温度差异最为明显.因为在该种天气条件下,路面温度变化相对稳定,昼夜路面温差较大,尤其在凌晨时间段,同一点的路面温度最低.因此,此种方法最适用于极端天气条件.

5 实测数据对比分析

以东陵交通气象监测站(K39.6)为固定站,选取路段区域附近 13 个实测点作为移动参考点.对移动式交通气象环境监测系统获得的数据和实测数据进行分析对比,并验证其准确性.

以 2015 年 2 月 17 日 5 点 49 分数据为例,依据当天判断的极端天气类型结果,应用极端天气条件下的相对路面温度分布进行数据分析和处理,根据固定站实测的路面温度数据推算得到 13 个移动实测点的路面温度数据,并与其在同一时刻的实测数据进行对比.路面温度对比结果见表 7,路面温度效果对比见图 6.

表 7 路面温度结果对比

Tab.7 Comparison of pavement temperature results

实测点位置	桩号	路面温度/°C			
		推算值	各点与固定点差值	实测值	推算值和实测值绝对误差
东陵交通气象监测站	K39+600		0	-4.5	0
红旗台分离式立交	K5+500	-4.42	0.08	-5.8	1.38
后丁香大桥	K8+700	-1.57	2.93	-1.7	0.13
西湖大桥	K9+800	-5.03	-0.53	-5.2	0.17
怒江街分离式立交	K15+700	-2.24	2.26	-1.5	-0.74
朱尔屯公铁立交	K24+900	-2.97	1.53	-2.8	-0.17
王家沟分离式立交	K30+500	-3.01	1.49	-3.4	0.39
后陵后堡公铁立交	K34+800	-5.18	-0.68	-5.2	0.02
东陵大桥	K39+000	-4.50	0	-5.2	0.70
石庙子分离式立交	K41+300	-3.89	0.61	-4.1	0.21
浑南高架桥	K59+300	-3.10	1.40	-2.3	-0.80
金宝台立交桥	K70+500	-2.60	1.90	-2.1	-0.50
谟家堡交通气象监测站	K73+740	-4.71	-0.21	-4.3	-0.41
开发区桥	K78+400	-3.98	0.52	-4.1	0.12

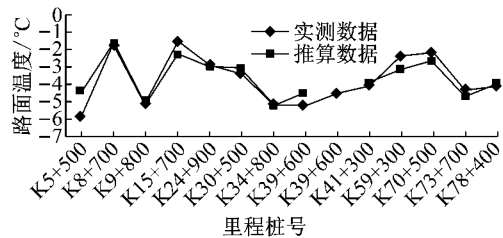


图 6 路面温度效果对比

Fig.6 Comparison of pavement temperature effects

由上述分析可知,13 个实测点的路面温度允许绝对误差在 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\pm 1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,该方法推算路面温度准确率分别达到 69.23%、92.31%,符合期望值.

6 结语

(1)以沈阳三环绕城高速公路(G1501)为实验路段,基于移动式交通气象环境监测系统,对路面结冰的关键参数——路面温度进行了移动采集.

(2)提出了高速公路路段 20 m 精度范围内路面温度数据的时空修正处理方法,使整个路段采集的路面温度数据能统一到同一时刻,并与桩号一一对应.

(3)拟合成不同天气条件下同一时刻的相对路面温度分布图,展现路段上不同位置与固定交通气象监测站的相对路面温度差异.通过检验在允许误差范围内路面温度的准确性可见,利用该方法得到的路面温度准确率很高,允许误差在 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,准确率达到 92.31%.成果有助于高速公路交通管理部门在冬季快速准确有效地监测路面温度、辨识路

面低温或易于结冰区域,提升冬季路面结冰状态的监测预警和安全保障水平。

参考文献:

- [1] TORBJORN Gustavsson. Thermal mapping—a technique for road climatological studies[J]. *Meteorological Applications*, 1999, 6(4): 385.
- [2] JORGEN Bogren, TORBJORN Gustavsson. Nocturnal air and road surface temperature variations in complex terrain[J]. *International Journal of Climatology*, 1991, 11(4): 443.
- [3] JORGEN Bogren, TORBJORN Gustavsson, MARIA Karlsson, *et al.* The impact of screening on road surface temperature[J]. *Meteorological Applications*, 2000, 7(2): 97.
- [4] 黄立葵,贾璐,万剑平,等. 沥青路面温度状况的统计分析[J]. *中南公路工程*, 2005, 30(3): 8.
HUANG Likui, JIA Lu, WAN Jianping, *et al.* Statistical analysis of asphalt pavement temperature profile[J]. *Central South Highway Engineering*, 2005, 30(3): 8.
- [5] 孙立军,秦健. 沥青路面温度场的预估模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(4): 480.
SUN Lijun, QIN Jian. Prediction model on temperature field in asphalt pavement[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2006, 34(4): 480.
- [6] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1984(3): 79.
YAN Zuoren. The analysis of pavement temperature field of multilayer system[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 1984(3): 79.
- [7] 周晋辉. 沥青路面温度状况试验研究[J]. *中南公路工程*, 2005, 30(2): 185.
ZHOU Jinhui. Test study on temperature fluctuations in asphalt pavements[J]. *Central South Highway Engineering*, 2005, 30(2): 185.
- [8] 刘熙明,喻迎春,雷桂莲,等. 应用辐射平衡原理计算夏季水泥路面温度[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(5): 623.
LIU Ximing, YU Yingchun, LEI Guilian, *et al.* Using radiant balance theory to calculate concrete road surface temperature in summer[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(5): 623.
- [9] 朱承瑛. 高速公路路面温度模型及其预报系统的研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2008.
ZHU Chengying. Research on expressway road surface temperature model and forecast system[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2008.
- [10] TORBJORN Gustavsson, JORGEN Bogren. Infrared thermography in applied road climatological studies [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(9): 1811.
- [11] TORBJORN Gustavsson. A study of air and road-surface temperature variations during clear windy nights [J]. *International Journal of Climatology*, 1995, 15(8): 91.
- [7] 刘文白. 砂土地基扩展基础在上拔荷载作用下的荷载-位移性能[J]. *工程力学*, 1998(增刊): 544.
LIU Wenbai. Load-displacement behavior of spread foundation embedded in sandy ground under uplift load[J]. *Engineering Mechanics*, 1998(Suppl.): 544.
- [8] 刘文白,周健,苏跃宏,等. 加筋风砂土抗拔试验研究(I)—基本性质和扩展基础抗拔模型试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(7): 1161.
LIU Wenbai, ZHOU Jian, SU Yuehong, *et al.* Uplift test study on reinforced aeolian sand(I)—Properties and uplift model tests on spread foundation[J]. *China Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1161.
- [9] 刘文白,周健,刘霖,等. 加筋风砂土抗拔试验研究(II)—抗拔荷载能力计算分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 430.
LIU Wenbai, ZHOU Jian, LIU Lin, *et al.* Uplift test study on reinforced aeolian sand(II)—Analysis and calculation of uplift bearing capacity[J]. *China Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 430.
- [10] 崔强,张振华,鲁先龙,等. 扩底基础上拔土体破坏模式及滑动面特征研究[J]. *金属矿山*, 2010, 39(11): 161.
CUI Qiang, ZHANG Zhenhua, LU Xianlong, *et al.* Study of failure modes and slid surface characteristics of soils mass around enlarge base foundation[J]. *Metal Mine*, 2010, 39(11): 161.
- [11] 乾增珍,鲁先龙,丁士君. 上拔与水平力组合作用下加筋风积沙斜柱扩展基础试验[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(3): 373.
QIAN Zengzhen, LU Xianlong, DING Shijun. Experiments on pad and chimney foundation in reinforced aeolian sand under uplift combined with horizontal loads[J]. *China Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(3): 373.
- [12] 乾增珍,鲁先龙,童瑞铭. 上拔水平力组合荷载作用下混凝土扩展基础承载性能试验[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(5): 573.
QIAN Zengzhen, LU Xianlong, TONG Ruiming. Experimental study on bearing capacity of concrete spread foundation under uplift combined with horizontal loads[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(5): 573.
- [13] 乾增珍,鲁先龙,丁士君. 塔克拉玛干沙漠输电线塔装配式基础试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(8): 2359.
QIAN Zengzhen, LU Xianlong, DING Shijun. Experimental study of assembly foundation for transmission line tower in taklimakan desert [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(8): 2359.
- [14] 鲁先龙,乾增珍,童瑞铭. 混凝土预制装配式扩展基础抗拔试验[J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 215.
LU Xianlong, QIAN Zengzhen, TONG Ruiming. Pullout behavior of precast concrete assembly spread foundation [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 215.
- [15] 国家能源局. 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
National Energy Administration. Technical code for design of foundation of overhead transmission line: DL/T 5219—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

(上接第 1383 页)