

# 基于自回归求和移动平均的冬季路温短临预测

汤筠筠<sup>1,2</sup>, 郭忠印<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 挖掘冬季路面温度在其他外部变量影响下未来短时间内的波动规律, 建立冬季路面温度短临预测模型. 基于交通气象监测站的冬季历史监测数据, 利用统计学方法确定路面温度的主要影响因素, 应用自回归求和移动平均 (ARIMA) 模型建模分析, 对未来短时间内的路面温度进行预测. 结果表明: 允许误差在  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内, 未来 3 h 的平均预测准确率分别达到 81.25% 和 99.65%, 对应的平均绝对误差为  $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 允许误差在  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内, 未来第 1 h 的平均预测准确率最高, 平均绝对误差最低, 分别达到 92.50% 和  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**关键词:** 道路工程; 路面温度; 时间序列; 短临预测模型

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

## Pavement Temperature Short-impending Prediction Based on ARIMA in Winter

TANG Junjun<sup>1,2</sup>, GUO Zhongyin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Research Institute of Highway of the Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Under the effect of other external variables, the fluctuation rule of pavement temperature with time was excavated in the future. Based on the historical data of a traffic meteorological monitoring station, the main affecting factors of pavement temperature were determined, and the short-impending prediction model of pavement temperature time series was established by applying autoregressive integrated moving average (ARIMA) model in order to predict pavement temperature in a short time. The results show that the predicted average accuracy reaches 81.25% and 99.65% respectively within allowable error range of  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  in the next 3 h. The predicted average accuracy and the mean absolute error are up to 92.50% and  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively within allowable error range of  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  in the next 1 h.

**Key words:** road engineering; pavement temperature; time series; short-impending prediction model

近年来, 冬季路面结冰导致交通事故频发以及拥堵延误和中断加剧, 给公路网运行的安全性和可靠性带来极大挑战. 路面温度是导致路面结冰的重要因素, 通常受到空气温度、相对湿度、露点温度、风速、降水条件等多种因素的综合影响. 对路面温度进行短时间内的有效预测, 将为冬季路面结冰状态的辅助判定, 精细化交通气象环境的监测预警, 冬季道路的运营管理、养护决策和应急服务等提供了必要的理论依据和技术支撑.

国内外早在 20 世纪 50 年代就开展了路面温度预测的相关研究. Barber<sup>[1]</sup>于 1957 年应用无限表面介质温度周期性变化热传导方程研究路面最高温度. 1988 年开始, 美国和加拿大学者通过美国战略公路计划、加拿大战略公路研究计划、美国长期路用性能研究项目等开展一系列研究, 应用统计学原理, 建立了路面最高和最低温度的计算模型. Diefenderfer<sup>[2]</sup>于 2003 年以弗吉尼亚州 Smart 试验路和季节性观测项目 2 个试验地点的路面温度和气温实测数据为依据, 采用回归方法建立了适用于不同地区的路面日最高和最低温度预估模型. 严作人<sup>[3]</sup>、吴赣昌等<sup>[4]</sup>运用热传导微分方程分析了层状路面结构的温度场. 徐世法<sup>[5]</sup>、孙立军等<sup>[6]</sup>、周晋辉<sup>[7]</sup>找出了路面不同深度处温度与气象参数之间的回归关系, 建立了路面温度预估模型. 刘熙明等<sup>[8]</sup>、朱承瑛<sup>[9]</sup>应用路面能量守恒方法, 考虑了太阳短波辐射、大气和地面的长波辐射以及潜热、感热传输等能量之间的平衡, 分别建立了水泥和沥青路面温度预报模型.

虽然国内外对路面温度预测有一定的研究基

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划 (2014BAG01B01)

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

基础,但是仍然存在以下问题:①瑞典、芬兰、德国等少数国家气象机构或商业机构主要采用高密度监测模式提供路面温度预测业务,应用气象学和传热学的基本原理采用数值分析方法来预测路面温度,建立的模型形式复杂,涉及参数多且不易获得.②国内对于路面温度预测的研究多侧重于路面面层温度场的分布,集中在路面以下较深处的温度预估,以及围绕路面在其使用年限内所能经受的极端温度条件(最高或最低温度)展开研究,为路面结构设计、路面性能改善、病害防治和处置提供理论依据.③国内气象部门通常基于热平衡理论或统计回归方法来预测路面温度,目前尚未达到业务化应用水平.中国气象局也仅是采用能量守恒原理实现未来 24 h 的路面高温预报服务.

本文通过回归分析寻找易于获取的路面温度主要影响因素,将它们作为外部变量,基于自回归和移动平均(ARIMA)模型,建立路面温度短临预测模型.考虑到目前路面温度预测在时间分辨率上难以满足公路运营管理部门及时性的需求,因此本文提出了路面温度短临预测的概念,即在保证路面温度预测时效性和准确率的情况下,根据实际需要设置预测时效,实现未来短时间内路面温度的准确预测.借鉴气象部门临近天气预报的时效性,基于高速公路特殊的线形条件和精细化预报预警的需求,对预测模型在未来 3 h 内路面温度的精度和误差进行了分析和验证,结果表明随着预测时间的临近,模型预测结果越准确,对路面结冰防灾减灾的现实意义也越大.

## 1 数据观测分析

为了掌握冬季路面温度的变化情况,依托沈阳三环高速公路(G1501)上的东陵交通气象监测站进行了时间跨度为 2 个冬季共 10 个月(2013 年 11 月至 2014 年 3 月、2014 年 11 月至 2015 年 3 月)的长期跟踪观测.

图 1 为 2013 年 12 月某一天路面温度、空气温度随时间的变化规律,图 2 为某一月每日整点路面温度变化规律,图 3 为冬季不同月份平均路面温度变化规律.

从图 1 和图 2 可见,冬季路面温度具有明显的日变化特征,有规律地上下波动.白天路面温度高于夜间,变化呈“单峰单谷”型.夜间路面温度降低,凌晨左右出现最低值,然后逐步升高,午后达到最高值,随后逐步下降直至夜间.图 3 中,将每分钟的路

面温度加权平均,得到每月的平均路面温度.可见,每年冬季 11 月至来年 3 月,各月的平均路面温度都是先降后升,其中 12 月和 1 月平均路面温度最低.从整个时变过程来看,路面温度构成的时间序列呈现出周期性的变化趋势,因此建立的路面温度时间序列短临预测模型的滚动周期选择 24 h 的整周期.

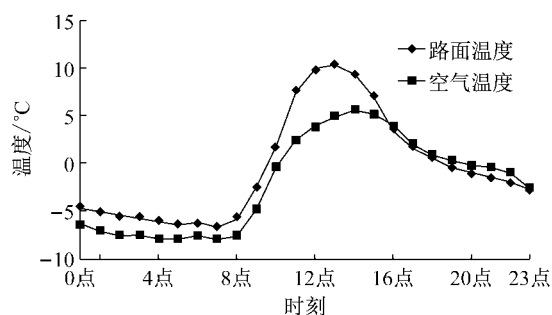


图 1 路面温度日变化

Fig.1 Daily variation of pavement temperature

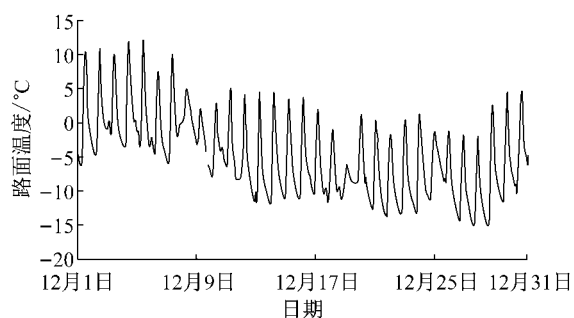


图 2 2013 年 12 月路面温度变化

Fig.2 Pavement temperature variation in December 2013

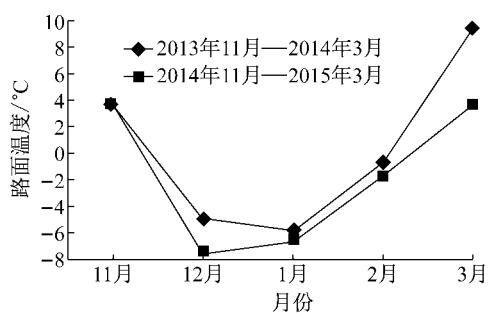


图 3 平均路面温度月变化

Fig.3 Monthly variation of average pavement temperature

## 2 时间序列预测模型构建

### 2.1 时间序列预测模型介绍

路面温度时间序列是指在一定的时间间隔内,以时间为标准排列的数据序列.虽然构成这个序列的单个序列值具有不确定性,但整个序列的变化却有一定的规律,可通过这种规律建立数学模型,利用

过去值和现在值预测未来值。

常用的时间序列预测模型包括自回归模型、移动平均模型、自回归移动平均模型,以及自回归求和移动平均模型。

2.1.1 自回归 AR(p)模型

p 阶自回归 AR(p)模型考虑的是时间序列第 t 期的观测值与前若干期的观测值之间的线性关系,其模型形式如下所示:

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + e_t \quad (1)$$

式中:p 为模型的阶次;y<sub>t</sub> 为时间序列第 t 时刻的观测值,被称为因变量或被解释变量;y<sub>t-1</sub>, y<sub>t-2</sub>, ..., y<sub>t-p</sub> 为时序 y<sub>t</sub> 的滞后序列,是同一平稳序列过去 p 个时期的观测值,被称为自变量或解释变量;e<sub>t</sub> 是随机误差项;c, φ<sub>1</sub>, φ<sub>2</sub>, ..., φ<sub>p</sub> 为自回归参数。

2.1.2 移动平均 MA(q)模型

q 阶移动平均 MA(q)模型是用过去各个时期的随机干扰或预测误差的线性组合来表达当前预测值,其模型形式如下所示:

$$y_t = \mu + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (2)$$

式中:q 为模型的阶次;e<sub>t</sub>, e<sub>t-1</sub>, e<sub>t-2</sub>, ..., e<sub>t-q</sub> 为模型在第 t 期,第(t-1)期, ..., 第(t-q)期的误差;μ 为时间序列的平均数;θ<sub>1</sub>, θ<sub>2</sub>, ..., θ<sub>q</sub> 为移动平均参数。

2.1.3 自回归移动平均 ARMA(p, q)模型

ARMA(p, q)模型为自回归模型和移动平均模型的混合模型,其模型形式如下所示:

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (3)$$

当 q=0 时,ARMA(p, q)退化为 AR(p);当 p=0 时,ARMA(p, q)退化为 MA(q)。

2.1.4 自回归求和移动平均 ARIMA(p, d, q)模型

ARIMA 模型是指将非平稳时间序列转化为平稳时间序列,将因变量仅对它的滞后值以及随机误差项的现值和滞后值进行回归所建立的模型。

ARIMA(p, d, q)模型中,AR 是“自回归”,p 为自回归项数;MA 为“移动平均”,q 为移动平均项数;d 为使之成为平稳序列所做的差分次数(阶数),通常 d=0, 1, 2. 当建立 ARIMA 模型时,需要选择合适的模型阶数,并借助自相关函数(ACF)和自相关分析图,以及偏自相关函数(PACF)和偏自相关分析图来识别时序特性,最终确定 p、d、q。

由于路面温度具有长期性和周期性变化的特点,具有一定的时间相关性,因此本文选用 ARIMA 模型作为路面温度时间序列预测方法来预测路面温度,这个模型一旦识别 p、d、q 后就可用时间序列的

过去值及现在值作为输入,预测未来值,而且短期预测精度较高。

2.2 时间序列预测模型建立

2.2.1 影响路面温度的因素选择

挖掘路面温度的主要影响因素,作为外部变量加入路面温度时间序列短临预测模型中,可以提高模型的预测精度。

对东陵交通气象监测站采集的所有参数进行逐步回归,分析各参数之间的相关性.表 1 所示为各个参数之间的相关系数,可以看出路面温度和空气温度、露点温度、相对湿度、风速之间的关系都比较密切,相关性较高,因此选定作为路面温度的主要影响因素。

表 1 相关系数矩阵

Tab.1 Correlation matrix

| 采集参数 | 路面温度与各采集参数间的相关系数 |
|------|------------------|
| 能见度  | 0.017            |
| 空气温度 | 0.872            |
| 路面温度 | 1.000            |
| 露点温度 | 0.549            |
| 湿滑系数 | 0.186            |
| 路面状态 | -0.062           |
| 相对湿度 | -0.457           |
| 风向   | -0.289           |
| 风速   | 0.301            |
| 水量   | 0.031            |
| 冰量   | -0.172           |
| 雪量   | -0.111           |

2.2.2 数据样本

随机抽取 8 组数据(共 16 天)作为样本(见表 2),分别利用每组数据中前 1 天 24 h 的路面温度及其主要影响因素数据作为训练样本,用后 1 天 3 h 的路面温度数据作为检验样本。

表 2 建模样本说明

Tab.2 Modeling sample description

| 时间范围                  | 前 1 天 24 h 训练样本数 | 后 1 天 3 h 检验样本数 |
|-----------------------|------------------|-----------------|
| 2013-11-07—2013-11-08 | 1 440            | 180             |
| 2013-12-20—2013-12-21 | 1 440            | 180             |
| 2014-01-24—2014-01-25 | 1 440            | 180             |
| 2014-02-16—2014-02-17 | 1 440            | 180             |
| 2014-03-13—2014-03-14 | 1 440            | 180             |
| 2014-11-07—2014-11-08 | 1 440            | 180             |
| 2015-01-06—2015-01-07 | 1 440            | 180             |
| 2015-02-17—2015-02-18 | 1 440            | 180             |

模型构建以表 2 中第 1 组样本数据为例,图 4 为 2013 年 11 月 7 日到 8 日的路面温度数据样本序列,其中左段曲线为 11 月 7 日 24 h 滚动周期的路面

温度逐分钟训练样本序列,右段曲线为 11 月 8 日 3 h 预测周期的路面温度逐分钟待验证样本(即检验样本)序列。

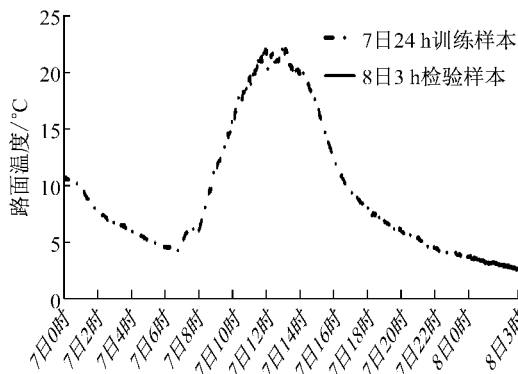


图 4 2013 年 11 月 7 日到 8 日路面温度训练和检验样本序列  
Fig.4 Training and test samples of pavement temperature from November 7 to 8 in 2013

2.2.3 时序分析

应用数据分析和挖掘软件(SPSS),导入路面温度以及空气温度、露点温度、相对湿度、风速等主要影响因素样本数据,建立基于 ARIMA 的路面温度时间序列短临预测模型,对未来 3 h 的路面温度进行短临预测。

通过分析,路面温度时间序列的自相关系数并未迅速趋于零,而且全部自相关系数都未进入置信区间,说明该时间序列是非平稳的,需要进行差分平稳化处理。

2.2.4 差分平稳化

对该时间序列进行差分平稳化处理,得到模型 ARIMA(p,d,q)中 p、d、q 的取值。在滞后期 k=5 之后,自相关函数衰减,并且均在置信区间范围内,可以认为是平稳的时间序列,建议 q 取值为 5。偏自相关函数  $\phi_{11} \sim \phi_{55}$  都落在置信区间之外,而且没有明显趋于零,建议 p 取值为 5。因此,初步确定经过一阶差分变换后的路面温度时间序列模型为 ARIMA(5,1,5)。

2.2.5 模型检验

应用 SPSS 软件对模型进行拟合,得到表 3 结果。

表 3 模型统计量

Tab.3 Model statistics

| 模型     | 预测变量 | 模型拟合统计量  |       | 显著性统计量 |       |         |
|--------|------|----------|-------|--------|-------|---------|
|        |      | 平稳 $R^2$ | $R^2$ | 统计量    | 模型自由度 | F 检验概率值 |
| 路面温度模型 | 路面温度 | 0.271    | 0.997 | 4.851  | 8     | 0.773   |

由表 3 可见,模型的决定系数  $R^2$  为 0.997,拟合

模型可以解释原序列 99.7% 的信息量,说明模型的拟合效果很好。平稳  $R^2$  为 0.271, F 检验概率值为 0.773,说明模型已经具备较好的拟合能力,模型预测的结果比较可信且准确,建立的时间序列模型非常好。

2.3 模型预测

应用模型预测未来 3 h 的路面温度,部分预测值如表 4 所示。

表 4 模型预测结果(2013-11-08)

Tab.4 Model prediction results(2013-11-08) °C

| 时刻    | 路面温度 |     |
|-------|------|-----|
|       | 预测值  | 真实值 |
| 00:00 | 3.57 | 3.6 |
| 00:01 | 3.57 | 3.6 |
| 00:02 | 3.55 | 3.6 |
| 00:03 | 3.57 | 3.6 |
| ⋮     | ⋮    | ⋮   |
| 01:00 | 3.14 | 3.2 |
| 01:01 | 3.14 | 3.2 |
| 01:02 | 3.13 | 3.2 |
| 01:03 | 3.12 | 3.1 |
| ⋮     | ⋮    | ⋮   |
| 02:00 | 2.71 | 3.0 |
| 02:01 | 2.70 | 3.0 |
| 02:02 | 2.70 | 2.9 |
| 02:03 | 2.69 | 2.9 |
| ⋮     | ⋮    | ⋮   |
| 02:56 | 2.30 | 2.5 |
| 02:57 | 2.30 | 2.6 |
| 02:58 | 2.29 | 2.6 |
| 02:59 | 2.28 | 2.6 |

2.4 预测结果分析与评价

对模型预测结果的精度和误差进行分析,初步检验在允许误差范围内模型预测路面温度的准确性和适用性。

2.4.1 预测精度和预测误差

图 5 为路面温度未来 3 h 预测结果与真实值对比曲线。中间两条曲线分别是未来 3 h 真实路面温度曲线(待验证路面温度)和预测路面温度效果曲线,上下 2 根曲线为真实路面温度的  $\pm 3.0$  °C 预测精度控制线。图 6 中曲线为未来 3 h 路面温度预测绝对误差曲线,上下两根直线分别为  $\pm 0.5$  °C 预测误差控制线。

从图 5 和图 6 可见,预测值波动较小,误差较低,对于未来 3 h 路面温度的预测效果都很不错,短期趋势相符。预测绝对误差都能控制在  $\pm 0.5$  °C 以内,路面温度未来 3 h 的预测准确率达到 100%,符合期望值。

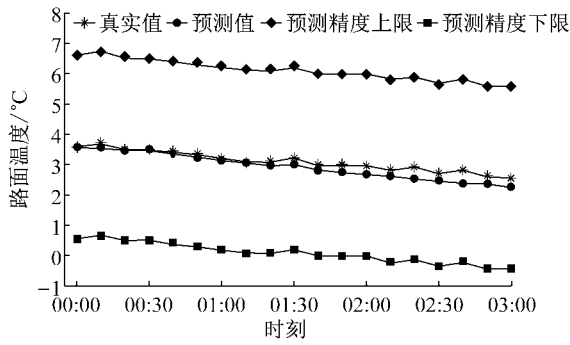


图 5 未来 3 h 路面温度预测效果

Fig. 5 Prediction effect of pavement temperature in the next 3 h

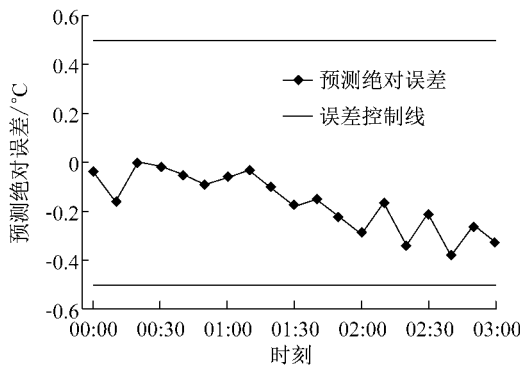


图 6 未来 3 h 路面温度预测绝对误差

Fig. 6 Predicted absolute error of pavement temperature in the next 3 h

2. 4. 2 绝对误差统计分布特性

对路面温度预测的绝对误差进行统计分析,得到未来 3 h 路面温度预测绝对误差频率分布和平均绝对误差,如表 5 和表 6 所示.

表 5 未来 3 h 路面温度预测绝对误差频率分布

Tab. 5 Predicted absolute error frequency distribution of pavement temperature in the next 3 h

| 绝对误差区间/°C  | 频率/% |
|------------|------|
| $[-3, -2)$ | 0    |
| $[-2, -1)$ | 0    |
| $[-1, 0)$  | 92   |
| $[0, 1)$   | 8    |
| $[1, 2)$   | 0    |
| $[2, 3]$   | 0    |

表 6 未来 3 h 路面温度预测平均绝对误差

Tab. 6 Predicted mean absolute error of pavement temperature in the next 3 h

| 时间      | 平均绝对误差/°C |
|---------|-----------|
| 未来第 1 h | 0.05      |
| 未来第 2 h | 0.14      |
| 未来第 3 h | 0.26      |

从表 5 可见,路面温度预测绝对误差频率分布在 1.0 °C 间隔内时,绝对误差全部分布在  $\pm 1.0$  °C

范围内,其中约 92% 的路面温度绝对误差分布在  $[-1, 0)$  °C 区间.

平均绝对误差指各次测量的绝对误差取绝对值后再平均.由表 6 可见,路面温度预测的平均绝对误差在未来 1 h 内最低,随着预测时间变长,将逐步增大.

同理得到东陵交通气象监测站其他 7 组样本,在不同的允许误差范围内 ( $\pm 0.5$  °C、 $\pm 1.0$  °C、 $\pm 2.0$  °C、 $\pm 3.0$  °C),滚动周期为 24 h,未来 3 h 的路面温度预测准确率及平均绝对误差统计情况,表 7 和表 8 为 8 组样本数据路面温度平均预测结果.

表 7 路面温度预测平均绝对误差

Tab. 7 Predicted mean absolute error of pavement temperature

| 预测时效    | 不同允许误差范围内平均绝对误差 |              |              |              |
|---------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
|         | $\pm 0.5$ °C    | $\pm 1.0$ °C | $\pm 2.0$ °C | $\pm 3.0$ °C |
| 未来第 1 h | 0.15            | 0.17         | 0.17         | 0.17         |
| 未来第 2 h | 0.22            | 0.27         | 0.27         | 0.27         |
| 未来第 3 h | 0.25            | 0.34         | 0.34         | 0.34         |
| 未来 3 h  | 0.21            | 0.26         | 0.26         | 0.26         |

表 8 路面温度平均预测准确率

Tab. 8 Predicted average accuracy of pavement temperature

| 预测时效    | 不同允许误差范围内平均预测准确率 |              |              |              |
|---------|------------------|--------------|--------------|--------------|
|         | $\pm 0.5$ °C     | $\pm 1.0$ °C | $\pm 2.0$ °C | $\pm 3.0$ °C |
| 未来第 1 h | 92.50            | 100.00       | 100.00       | 100.00       |
| 未来第 2 h | 82.71            | 100.00       | 100.00       | 100.00       |
| 未来第 3 h | 68.54            | 98.96        | 100.00       | 100.00       |
| 未来 3 h  | 81.25            | 99.65        | 100.00       | 100.00       |

3 结语

依据东陵固定式交通气象监测站的历史数据,对其路面温度时间序列变化规律进行分析,得到的路面温度遵循每天复现的规则,具有周期性平稳变化趋势,因此可选择 24 h 的整周期作为滚动周期对路面温度时间序列进行短时预测.

利用统计学方法确定路面温度的主要影响因素,应用 ARIMA 模型预测方法建模,对未来 3 h 路面温度预测结果的准确率和误差均值进行分析.

研究表明,空气温度、露点温度、相对湿度、风速等参数被选为路面温度的主要影响因素,通过增加这些外部变量建立的时间序列模型对未来 3 h 的路面温度进行预测.通过检验在允许误差范围内利用 ARIMA 模型预测路面温度的准确性和适用性可见,模型的预测效果非常好.在未来 3 h 的预测准确率都很高,允许误差在  $\pm 0.5$  °C 和  $\pm 1.0$  °C 范围

内,未来 3 h 的平均预测准确率分别达到 81.25% 和 99.65%,对应的平均绝对误差分别为 0.21 °C 和 0.26 °C. 在 ±0.5 °C 允许绝对误差范围内,未来第 1 h 的预测准确率最高,平均绝对误差最低,分别达到 92.50% 和 0.15 °C,可见未来第 1 h 路面温度的预测效果要优于未来第 2 h 和第 3 h,模型更适合短临预报.

本文建立的模型可以满足路面温度短临预测的需求,而且该模型精度高,可以有效地预测路面温度在其主要影响因素的作用下未来 3 h 内随时间的波动规律. 模型预测精度满足业务需求,突破了路面温度未来短时间内精细化预测的技术障碍. 研究成果将有助于大幅缩短路面结冰状态的判断时间,作为交通运输管理部门进行冬季路面结冰状态监测预警的主要依据. 同时,研究成果不仅适用于交通运输行业,也是气象部门业务系统亟需攻关的技术难题.

#### 参考文献:

- [1] BARBER E S. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports[R]. Washington DC: Highway Research Board of National Research Council, 1957.
- [2] DIEFENDERFER B K. Development and validation of a model to predict pavement temperature profile[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2003.
- [3] 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 multi-layer system[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1984(3):79.
- [4] 吴赣昌, 凌天清. 半刚性基层温缩裂缝的扩展机理分析[J]. 中国公路学报, 1998, 11(1):21.  
WU Ganchang, LING Tianqing. The analysis of developing mechanism of thermal crack of the semi-rigid roadbase [J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(1):21.
- [5] 徐世法. 沥青路面温度分布规律的研究[J]. 北京公路, 1991(5):15.  
XU Shifa. Study on asphalt pavement temperature distribution pattern[J]. Beijing Highway, 1991(5):15.
- [6] 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. Model of prediction of asphalt pavement temperature fields [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(4):480.
- [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.