

文章编号:1671-8879(2017)06-0024-07

不同层位沥青路面温度预估模型

王 琨^{1,2},郝培文²

(1. 山东交通学院 交通土建工程学院,山东 济南 250031; 2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了明确山东地区沥青路面内部温度分布规律,以指导沥青路面设计,开展以路表温度及气候条件预测沥青路面内部温度的研究,以山东滨德(滨州—德州)高速公路为依托,通过对试验路段不同天气状况下沥青路面不同深度处温度和该区气象数据测量。采用统计学方法分析不同气象条件下温度数据,并建立适用于沥青面层和柔性沥青基层的 2 种温度预估模型,并将该模型、BELLS3 温度模型预估结果与实测温度进行对比,验证提出的模型的精度。研究结果表明:沥青路面的温度分布与外界气温关系密切,且距路表面越近,其敏感性越高;LSPM(大粒径透水性沥青混合料)柔性基层主要接受来自面层的热量传递,使得不同深度沥青路面结构的温度时间分布规律存在显著差异,面层温度时间分布变化具有明显周期性,呈近似正弦函数曲线;LSPM 柔性基层温度随时间变化略平缓;在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 误差范围内,提出的模型温度预估结果准确性达到 64.1%,而 BELLS3 温度模型仅为 54.8%,提出的模型具有较高的预测精度和实用性。

关键词:道路工程;路面温度;预估模型;层位

中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A

Prediction model of temperature in different layers of asphalt pavement

WANG kun^{1,2}, HAO Pei-wen²

(1. College of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250031, Shandong, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to define the internal temperature distribution law of asphalt pavement in Shandong district, this paper carried out the study by surface temperature of asphalt pavement and climate condition to predict the internal temperature of asphalt pavement, so as to further guide the asphalt pavement design. Taken Binzhou to Dezhou Freeway in Shandong as research object, the pavement temperature at different depths of asphalt pavement and the hourly climate data were gathered during different weather conditions. Temperature data of different weather conditions were analyzed by statistics method, and two kinds of temperature prediction models suitable for asphalt pavement and flexible base asphalt pavement were established. Prediction results of this model and BELLS3 temperature model were compared with the measured temperature to verify the accuracy of the proposed model. The results show that the asphalt temperature has a close relationship with air temperature, and it is more sensitive when the depth is close to pavement surface. The temperature distribution of different depths in asphalt pavement structure present significant differences, due to LSPM (large stone porous asphalt mixes) flexible

收稿日期:2017-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51408050);山东省交通科技创新项目(2012A-07)

作者简介:王 琨(1978-),女,山东济南人,教授,工学博士,E-mail:190916623@qq.com。

base which mainly received heat from the surface of asphalt pavement. The temperature distribution of asphalt pavement appears obvious periodicity and approximate sine curve. The temperature distribution of LSPM flexible base is slightly flat with the change of time. Within the error range of $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the temperature prediction accuracy of the proposed model is 64.1%, while the accuracy of BELLS3 temperature model is only 54.8%, which indicates that the proposed temperature prediction model has higher prediction accuracy and practicability. 1 tab, 10 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; pavement temperature; prediction model; layer

0 引 言

沥青路面结构层直接暴露在大气中,在使用寿命周期中受各种自然因素的综合作用^[1],导致各种病害的发生,温缩裂缝成为中国沥青路面的主要病害之一^[2]。尽管沥青及其混合料具有温度敏感性,但路面病害发生不仅与路面温度相关,路面温度年频率分布特征的差异也会导致沥青路面呈现出不同的破坏发展规律^[3-5]。不同温度条件下,沥青混合料呈现出不同的性能,其破坏形式也存在较大差异:夏季高温导致混合料产生流动性,加之行车作用导致路面出现车辙病害;冬季气温骤降,且昼夜温差大导致沥青路面出现温缩裂缝^[6]。沥青混合料强度、稳定性、破坏形式与温度的关系密切,开展沥青路面温度分布规律及预估,对沥青路面病害的发展研究具有重要意义。

自 1926 年,美国 Arlington 路面温度采集开始,研究人员对路面结构温度的研究已有相当长时间,主要以理论分析^[3-5,7-10]和数理统计作为研究方法^[11]。AASHTO 根据大量试验资料提出路面温度与深度的关系,用以预测路表、中点深度及底层的温度,且以三者的均值作为面层有效温度,提出了预估路表最高温度的热平衡方程,虽然仅能预测路表温度,但也为路面温度预测提供了更为开阔的思路。基于 BELLS 和 BELLS2 的 BELLS3 温度预估模型解决了 BELLS 高估较低温度的路面温度,且低估较高温的路面温度的问题,然而 BELLS3 温度预估模型在夜晚或低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时适用性较低、预测结果准确性差^[12]。美国沥青协会提出的 AI 模型以面层深度 20 mm 位置温度为路面设计温度,采用月平均大气温度作为参数进行温度预测^[13-16]。然而月温度跨度相对较大,温度代表性差,同时该模型温度数据均基于美国及加拿大地区,对于其他地区适用性较低。Park 等提出密歇根模型,用以预估路面内部温度^[14]。孙立军等对唐山、乌鲁木齐、上海 3 个代表性区域建立温度预估模型,并根据不同气候条件来修正预测结果^[17]。韦金城等研究了路面温度场与各影响因素的关系,建立了适用

于雨天及晴天的路表温度预估模型^[18]。

综上,国内外对温度场研究较多,建立了相应的温度预估模型,并考虑了降雨等因素对温度场的影响,但未考虑不同温度预估模型所适用地区的差异^[19],模型参数的选取也不一致。因此,前述预估模型在不同地区、不同层位、不同天气状况及气候条件下不具有普遍的适用性。中国高速公路面层厚度一般在 20 cm 左右,面层厚度的不一致造成沥青路面结构内部温度分布存在一定差异,同时不同结构的沥青面层其内部温度的变化规律也不同。因此,本文依托山东滨德(滨州—德州)高速公路试验段,进行温度场数据采集,分别讨论不同层位沥青路面的温度变化规律,并针对不同天气状况讨论沥青路面内部温度的变化规律,建立山东地区的温度预估模型,以期明确该地区沥青路面的温度变化趋势,从而指导路面设计。

1 路面温度场数据分析

1.1 路面温度场数据采集设备及方法

研究依托山东滨德高速公路,该路段是连接环渤海经济带与其他经济腹地的通道,也是“五纵连四横,一环绕山东”规划的重要路段,该路段采用的典型路面结构见图 1。

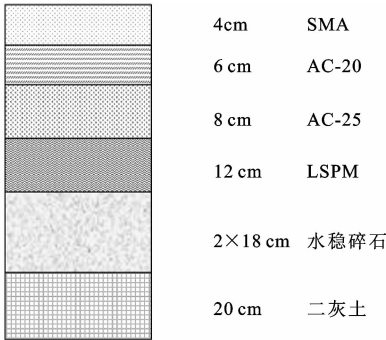


图 1 沥青路面结构

Fig. 1 Asphalt pavement structure of test section

该路段处于夏热冬寒区,夏冬季路面结构温差大,沥青路面结构内部温度变化频繁,路面结构在车辆荷载和温度应力共同作用下,病害较为严重。在

沥青路面结构内部布设底层热耦温度传感线、面层温度传感器、红外线测温仪,并通过温度数据采集系统采集。温度采集设备及埋设方法如下:

(1)底层采用 K 形龙宇鑫 DS18B2 防水型热耦温度传感器,精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,可连接数据采集器来采集不同时间和深度路面结构温度值。本研究采用的底层热耦温度线埋设在面层底层,其分支温度探针分别向上放置在 1、2 cm 处,向下放置在 2、3、4 cm 处,以准确地获取不同结构层的温度状况。为保证温度传感器放置准确性并能承受后续施工作业,先在欲埋设的位置安置金属长条块,并进行碾压形成凹槽,凹槽内放入底层温度传感器并填塞沥青混凝土作为衬垫,最后覆盖沥青混凝土完成埋设。

(2)沥青面层温度采集所采用温度传感器与底层一致。确定好面层热电偶的埋设位置后进行钻孔,确保孔深与传感器埋设深度一致;清理孔后埋设热电偶,且需保证热电偶的测试端与孔底紧密接触;回填钻出材料并捣实,用玻璃胶密封以防止水分渗入。传感器埋设示意图 2。

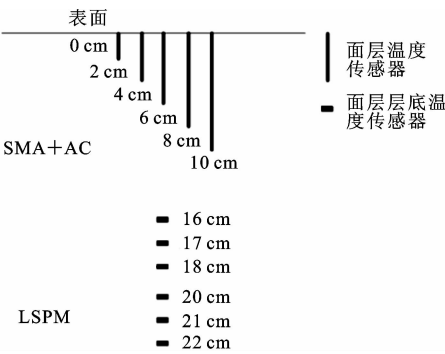


图 2 传感器布设位置

Fig. 2 Sensor position in pavement structure

(3)面层表面温度采集采用 Optris 公司的 mini plus 红外线温度枪,其量程为 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 530\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。大气温度、热交换及辐射是影响路面温度的主要因素^[19],因此采用气象采集系统采集大气温度及辐射状况。采用 MEP 路面温度采集系统,以 0.5 s 的反应时间,0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的分辨率采集环境温度,见图 3。

收集试验路段全年的温度数据,包含气温、路表温度与内部不同深度的温度,并根据路面温度分布特性建立山东省公路温度预估模型,以掌握山东地区沥青路面结构内部温度变化规律。

1.2 路面温度场数据采集

根据滨德高速公路实测沥青路面温度场数据,绘制不同天气条件时面层内温度变化状况,见下页

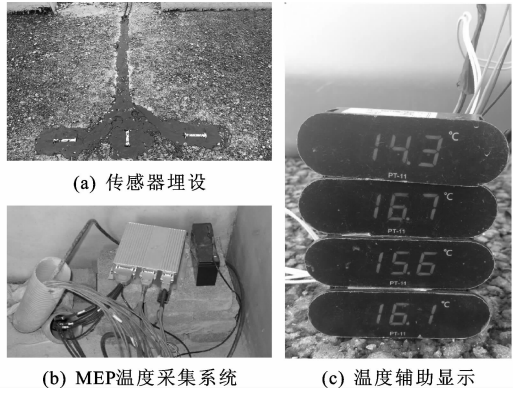


图 3 温度传感器埋置及采集

Fig. 3 Data acquisition and temperature sensor embedded

图 4。从图 4 可以得出:沥青路表温度的变化与气温变化趋势相似,略有滞后且高于气温。图 4(a)为晴天的不同深度 d 处的温度变化情况,可知,沥青路面受太阳辐射后,沥青层内部开始升温,午后辐射减弱后沥青层温度开始下降,在 8:00~17:00 温度先升高后下降。对比沥青层 10、16、22 cm 深度处温度变化情况可以看出,越接近路表,路面内部温度受辐射影响越敏感。夜间受大气温度下降影响,路面内部温度下降明显,且 16 cm 深度处面层温度要低于气温,此后一直是 LSPM 柔性基层温度高于面层温度的状态,直至出现下次温度变化循环。图 4(b)为阴天时不同深度沥青路面温度变化,可见,路面整体温度与晴天相比大幅降低,沥青面层温度波动幅度不大,且路面各深度处的温度差异较小。阴转雨时,沥青路面温度变化见图 4(c);冬季寒流低温时,沥青路面内部温度变化见图 4(d)。气候、日照辐射、环境温度等因素造成整体路面温度曲线相近。综上所述,晴天时路面有明显的升降温现象且温度变化范围大,温度变化曲线类似正弦函数曲线。阴天、雨天及冬季寒流天气时,因辐射受限,路面温度无明显升温及起伏状态,路面整体温度偏低,气温波动较小。

路面在短时间内承受温度升降的交替变化,路面结构层内随之出现温度应力,由此产生温度疲劳裂缝。因此,路面结构内不同深度的温度场变化规律研究具有重要的控制意义,深入研究路面结构内不同深度的路面温度变化、分布规律,对沥青路面的优化设计及温缩裂缝控制具有重要意义。

2 沥青路面温度预估模型的建立

国内外提出的各种预估模型考虑的因素不同,不具有广泛的适用性,且均未考虑不同层位混合料差异对路面内部温度的影响。通过对山东地区路面试验

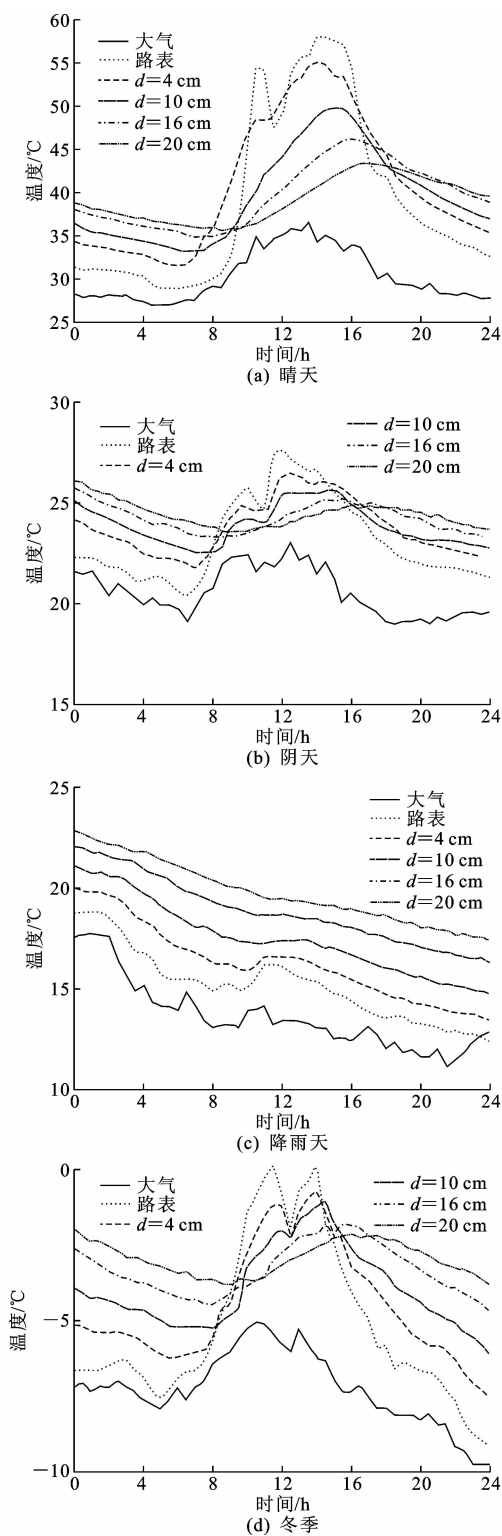


图 4 不同天气状况下路面温度曲线

Fig. 4 Curves of pavement temperature under different weather conditions

段实测温度场数据分析,表明沥青结构层差异导致路面温度分布趋势存在差异。与大气接触并受日光照射的面层,其温度变化存在明显的起伏,温度敏感性高;而 LSPM 柔性基层温度变化主要来自中上面层的

传递,其温度变化较为平缓。由于 2 个层位温度形态不同,导致沥青层位温度预测值与实测值产生较大误差。为了准确预测不同层位沥青层的温度变化,本文针对不同层位建立相应的温度预估模型。

阴雨天及冬季寒流天气时,太阳辐射热传递作用有限,路面温度起伏不明显,柔性基层的温度变化更不明显。同时,因山东地区降雨较为集中,晴朗天气居多,且晴天路面温度较高对路面病害影响大。基于上述原因,本文建立的 2 种温度预估模型均在晴朗或者多云天气,而未考虑阴雨天及冬季寒流天气状况。

2.1 面层温度预估模型的建立

根据上述温度场数据采集,可得到中上面层温度分布,温度与时间近似呈正弦函数关系。根据实测资料,将不同月份日路面温度转换为介于 1 与 -1 之间的正弦函数值,建立路面温度函数。采用 SPSS 建立时间函数,即

$$f(t) = \sin(-3.3252t + 7.69) \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为时间正弦函数,其中, t 为归一化时间, $t = T/24$, T 为 24 小时制时间, $0 < t < 1$ 。

图 5 中各月份的温度正弦值分布与代表性时间函数之间并不能完全吻合,考虑到路表温度、大气温度以及路面深度的不同都会造成路面内部温度差异,因此引入正弦函数系数进行修正。

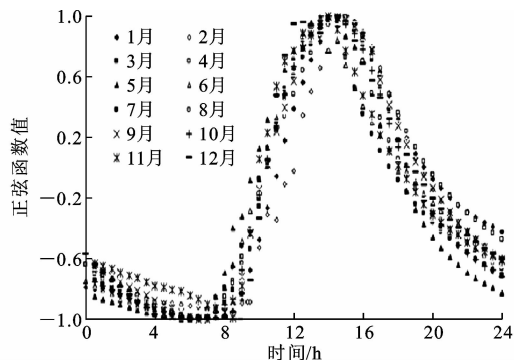


图 5 温度正弦值与时间关系

Fig. 5 Relationships between time and sine function value

与国内外其他温度预估模型相比,本文模型不仅采用路表温度、预测深度模型参数,同时考虑到大气温度辐射作用的影响,采用实时大气温度替代其他模型中的检测时间参数,从而进一步提高模型预测的准确性。结合实测沥青路面温度资料及气候状况,建立适用于山东省的面层温度预估模型

$$T_d = f(t)[2.42 + T_{\text{air}}(-0.10 + 0.002I_R + 0.423\lg(d))] + \lg(d)[I_R(-1.41 + 0.002T_{\text{air}} - 0.13f(t)) + (1.01 + 1.449T_{\text{air}})] - 2.012T_{\text{air}} + 2.811I_R - 1.16 \quad (2)$$

式中: T_d 为路面深度 d 处的预测温度($^{\circ}\text{C}$); T_{air} 为量测归一化时间 t 的大气温度($^{\circ}\text{C}$); I_R 为红外线枪量测表面温度($^{\circ}\text{C}$); $f(t) = \sin(-6.325\ 2t + 5.698\ 9)$, 为时间函数。

由于仅在晴天与多云天气情况下, 沥青面层温度-时间变化曲线与正弦时间函数吻合, 而阴雨及冬季寒流天气与之不符, 故该预估模型仅适用于晴天与多云天气的面层预测。

本文模型预测结果与实测统计分析见表 1。从表 1 可以得出: 95% 的置信区间内, 随着深度的增加其预测误差也在增加, 判定系数 R^2 逐渐降低; 直至预测深度在 10 cm 以下时, 面层温度分布状态逐渐转变为 LSPM 基层温度分布状态。至 12 cm 深度其预测值 95% 的置信区间误差为 $\pm 5.0\ ^{\circ}\text{C}$, R^2 为 0.86, 预测误差已经越来越大, 可以认为预测深度超过 10 cm 后本文模型已经不适用。因此, 所建立模型适用于中上面层的温度预测。

表 1 不同深度预测结果统计比较

Tab. 1 Comparisons of predicted results of different depths		
预测深度/cm	95% 置信区间误差/ $^{\circ}\text{C}$	判定系数 R^2
2	± 2.0	0.96
4	± 3.0	0.94
6	± 3.0	0.94
8	± 3.5	0.92
10	± 4.0	0.89
12	± 5.0	0.86

图 6 为该面层预估模型的误差分析结果。由图 6 可知: 在 95% 置信区间内, 误差为 $0\ ^{\circ}\text{C}$ 的数据占 50.1%, 为 $(0\ ^{\circ}\text{C}, 1\ ^{\circ}\text{C}]$ 、 $(1\ ^{\circ}\text{C}, 2\ ^{\circ}\text{C}]$ 、 $(2\ ^{\circ}\text{C}, 3\ ^{\circ}\text{C}]$ 的数据分别占 14%、13.7%、11.1%。

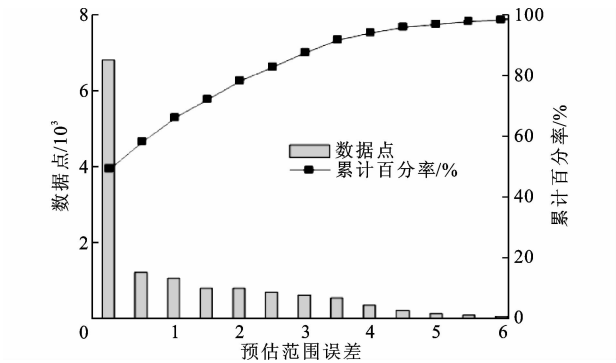


图 6 面层温度预估模型预估结果误差分析

Fig. 6 Error analysis of predicted results of prediction model of temperature of pavement structure

为了验证所建立面层预估模型的准确性, 本研究以面层温度采集数据为例, 采用 LTPP 所提出的 BELLS3 进行精确性比较。BELLS3 预估模型为

$$T_d = 0.95 + 0.892I_R + [\lg(d) -$$

$$1.05][-0.448I_R + 0.621D + 1.83\sin(h_{18} - 15.5)] + 0.042I_R\sin(h_{18} - 13.5) \quad (3)$$

式中: D 表示检测前 1 天的平均气温($^{\circ}\text{C}$), 为前 1 天最高温和最低温的平均; $h_{18} = 18T/24$, 为以 18 小时制换算的归一化时间。

时间参数的转换参照文献[20]中方法。采用 BELLS3 预估模型预测的路面结构层温度误差分析见图 7。由图 7 可知: 在 95% 置信区间内, 误差为 $0\ ^{\circ}\text{C}$ 的数据占 33.9%, 为 $(0\ ^{\circ}\text{C}, 1\ ^{\circ}\text{C}]$ 、 $(1\ ^{\circ}\text{C}, 2\ ^{\circ}\text{C}]$ 、 $(2\ ^{\circ}\text{C}, 3\ ^{\circ}\text{C}]$ 的数据分别占 15%、10.4%、20.2%。与本文模型相比, 误差在 $0\ ^{\circ}\text{C}$ 预测点明显减少, 而误差 $1\ ^{\circ}\text{C}$ 预测结果明显增加, 同时误差在 $4.5\ ^{\circ}\text{C}$ 和 $5\ ^{\circ}\text{C}$ 时却明显增加。这说明本文模型在本地区的适用性比 BELLS3 预估模型强。分析原因: BELLS3 预估模型采集数据为白天数据, 对夜间温度预测准确性较低; 同时, 其参数获取依据国外气候条件, 与山东地区气候条件、辐射及热交换过程均存在一定差异, 因此, BELLS3 预估模型参数缺乏针对性, 而本文模型建立在山东地区气候、辐射、热交换状态实测数据的基础上, 参数选择具有针对性, 预测结果与实测结果更为接近。

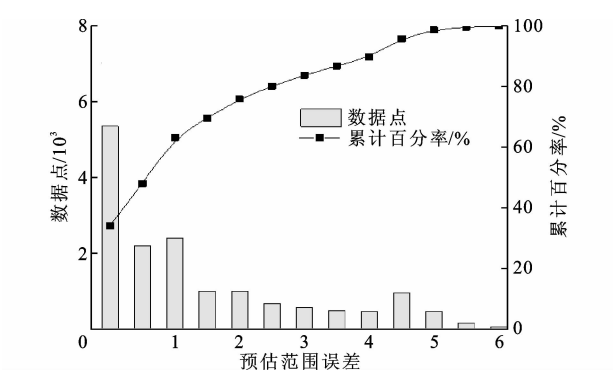


图 7 BELLS3 温度预估模型预估结果误差

Fig. 7 Error of predicted results of BELLS3 prediction model of temperature

2.2 柔性基层温度预估模型的建立

为了明确不同层位混合料差异对路面内部温度的影响, 本文对路面内部不同层位温度预测分别进行讨论, 以提高路面温度预测的准确性。LSPM 柔性基层温度分布与面层温度分布形态不同, 路面 16、22 cm 深度处的温度变化情况见下页图 8、图 9。由图 8、图 9 可知, 夏季温度起伏稍大, 冬季起伏较为平缓, 无论 16、22 cm 深度处温度分布形态均与上中面层的温度分布形态不同。因此, 本文采用多项式函数建立模型。

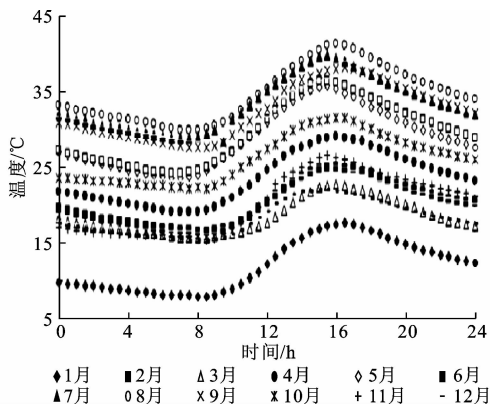


图 8 路面内部 16 cm 处不同月份下 24 h 温度变化
Fig. 8 Changes of 24 h asphalt pavement temperature in 16 cm of different months

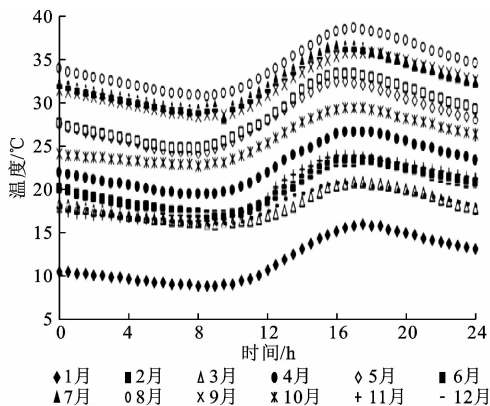


图 9 路面内部 22 cm 处不同月份下 24 h 温度变化
Fig. 9 Changes of 24 h asphalt pavement temperature in 22 cm of different months

参数设置与面层温度预估模型相同,包含路表温度、大气温度、时间函数与预测位置深度,建立的 LSPM 柔性基层温度预估模型为

$$T_d = -0.259T_{air} + 0.470T_{air}\lg(d) + 0.057I_R T_{air} - 0.023I_R T_{air}\lg(d) + 0.0741I_R\lg(d) + I_R(-2.54 \times 10^{-8}t^6 + 2.11 \times 10^{-5}t^4 - 0.004t^2 - 0.008t) \quad (4)$$

图 10 为基层预估模型误差分析结果。统计结果表明,在 95%置信区间 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围,误差为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的数据占 59.1%,为 $(0\text{ }^{\circ}\text{C}, 1\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 、 $(1\text{ }^{\circ}\text{C}, 2\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 、 $(2\text{ }^{\circ}\text{C}, 3\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 的数据分别占 12%、14%、7.9%。综上可知,误差在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内数据占 85.1%,因此,认为该模型可以较为准确地预测沥青柔性基层内部温度。

3 结 语

(1)路面温度与气温均呈周期性变化,但路面温度变化会略有滞后。天气晴朗时,路面一昼夜内呈现温度升降起伏循环现象;不同月份温度随时间变

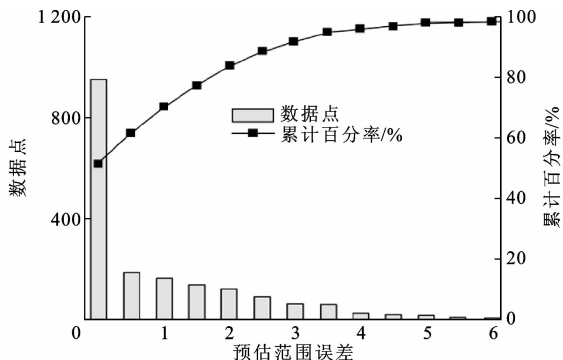


图 10 基层温度预估模型预估结果误差
Fig. 10 Error of predicted results of prediction model of temperature of basement

化的趋势类似,不同结构层沥青路面深度不同,接受大气热传导方式不同,表现出不同层位对外界温度敏感性的差异。

(2)面层温度分布波动显著,而 LSPM 柔性基层温度变化较为平缓。本研究根据不同层位处的温度分布形态,建立不同层位的温度预估模型。以面层实测温度数据为例,将本文模型与 BELLS3 预估模型进行对比发现,针对山东地区气候、辐射及热交换状况,本文模型预估结果更为准确。

(3)面层温度预估模型适用于预测深度范围为沥青路表以下 10 cm 以内;而 LSPM 温度预估模型则适用于下面层及柔性基层。温度分布的实测值与预测值对比表明,路表 10 cm 以内的范围受温度影响最大,该路面深度范围内极易出现各种病害。

(4)因冬季寒流季节及阴雨天气,沥青路面接受太阳辐射热传导能量有限,不论柔性基层还是沥青面层,其内部温度变化规律不明显,尚未建立适用于寒流季节及阴雨天气的温度预估模型。下一步将对该气候条件下路面温度预估模型进行研究,并将温度预估模型与混合料性能联系,分析沥青路面在温度及车辆荷载作用下的破坏模式,以指导沥青路面设计。

参考文献:

References:

[1] 陈嘉祺,罗苏平,李 亮,等. 沥青路面温度场分布规律与理论经验预估模型[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,44(4):1647-1656.
CHEN Jia-qi, LUO Su-ping, LI Liang, et al. Temperature distribution and method-experience prediction model of asphalt pavement[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(4):1647-1656.

- [2] 李志栋,黄晓明,陈广秀,等. 沥青混凝土路面可靠性水平评价研究[J]. 北京工业大学学报,2012,38(8):1208-1213.
LI Zhi-dong, HUANG Xiao-ming, CHEN Guang-xiu, et al. Research on reliability evaluation of asphalt pavement[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(8): 1208-1213.
- [3] 吁新华,谈至明,胡洪龙,等. 沥青面层的车辙等效温度[J]. 同济大学学报:自然科学版,2014,42(5):701-706,729.
YU Xin-hua, TAN Zhi-ming, HU Hong-long, et al. Rutting equivalent temperature for asphalt pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(5): 701-706, 729.
- [4] 方友军. 旧水泥路面沥青加铺层温度荷载应力分析[J]. 筑路机械与施工机械化,2012,29(5):58-59,62.
FANG You-jun. Temperature load stress analysis of asphalt overlay on old cement pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(5): 58-59, 62.
- [5] 原 驰,王朝辉. 沥青路面复合基层的合理结构研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(4):50-53.
YUAN Chi, WANG Chao-hui. Research on reasonable structure of composite base of asphalt pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(4): 50-53.
- [6] CHEN J S, LIN K Y, YOUNG S Y. Effects of crack width and permeability on moisture-induced damage of pavements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(3): 276-282.
- [7] YAVUZTURK C, KSAIBATI K, CHIASSON A D. Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional, transient finite-difference approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(4): 465-475.
- [8] 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,1984,12(3):76-85.
YAN Zuo-ren. Analysis of the temperature field in layered pavement system[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1984, 12(3): 76-85.
- [9] 吴赣昌. 半刚性基层沥青路面温度场的解析理论[J]. 应用数学和力学,1997,18(2):169-176.
WU Gan-chang. The analytic theory of the temperature fields of bituminous pavement over semi-rigid roadbase [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1997, 18(2): 169-176.
- [10] 谈至明,吁新华. 沥青面层的疲劳等效温度[J]. 同济大学学报:自然科学版,2013,41(2):197-202.
TAN Zhi-ming, YU Xin-hua. Fatigue equivalent temperature for asphalt pavements [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(2): 197-202.
- [11] DIFENDERFER B K, AL-QADI I L, REUBUSH S D, et al. Development and validation of a model to predict pavement temperature profile [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2003.
- [12] MARSHALL C, MEIER R, WELCH M. Seasonal temperature effects on flexible pavements in Tennessee [J]. Transportation Research Record, 2001(1764): 89-96.
- [13] RAAD L, SABOUNDJIAN S, SEBAALY P, et al. Minimum pavement temperature modeling and mapping for Alaskan conditions [J]. Transportation Research Record, 1998(1643): 86-94.
- [14] PARK D Y, BUCH N, CHATTI K. Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections [J]. Transportation Research Record, 2001(1764): 97-111.
- [15] HUANG Y H. Pavement analysis and design [M]. 2nd ed. Bergen: Prentice Hall, Inc, 2013.
- [16] LUKANEN E O, STUBSTAD R, BRIGGS R. Temperature predictions and adjustment factor asphalt pavement [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2011.
- [17] 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):480-483.
SUN Li-jun, QIN Jian. Prediction model on temperature field in asphalt pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(4): 480-483.
- [18] 韦金城,庄传仪,高雪池,等. 基于疲劳损伤的沥青路面设计温度及预估模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(5): 6-10.
WEI Jin-cheng, ZHUANG Chuan-yi, GAO Xue-chi, et al. Design temperature and its prediction model for asphalt pavement based on fatigue failure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(5): 6-10.
- [19] 马正军,谈至明,钱 晨. 沥青路面面层温度分布规律[J]. 中国公路学报,2014,27(4):9-15.
MA Zheng-jun, TAN Zhi-ming, QIAN Chen. Distribution law of asphalt pavement temperature [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(4): 9-15.
- [20] 徐慧宁,张 锐,谭忆秋,等. 季节性冰冻地区冬季路面温度分布规律[J]. 中国公路学报,2013,26(2):7-14.
XU Hui-ning, ZHANG Rui, TAN Yi-qiu, et al. Temperature distribution of pavement in seasonally frozen regions in winter [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 7-14.