

基于路表实测温度的路面温度场估计模型

谈至明¹, 马正军¹, 邹晓翎²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要: 从路面温度变化具有周期性为出发点建立了根据路表温度推算路面结构任一深度温度与自路表至某一深度的层平均温度的估算模型, 并通过引入深度传导时间 τ_z 以消除路面材料导温系数不同引起的差异. 根据广州、宁波、大同三地的路面结构温度场观测站为期 1 年的路面温度实测数据, 以模型估算温度与实测温度之残差的标准差最小为控制目标, 确定了模型中 4 个待定参数即短时间温度变化的时长 t_1 、基线温度变化的时长 t_2 、短时温度变幅的衰减系数 k_1 、基线温度变幅的衰减系数 k_2 的回归式. 拟合结果表明, 广州、宁波、大同三地的 2 种路面(沥青路面、水泥混凝土路面)不同深度温度及自路表至某一深度的层平均温度的模型估计值与实测值之残差的标准差仅 1℃ 左右, 最大不超过 1.52℃, 残差均值小于 0.5℃. 因此, 预估公式具有较好的精度与普适性.

关键词: 路面工程; 路面温度场; 路表温度; 平均温度

中图分类号: U416

文献标志码: A

Pavement Temperature Estimation Model Based on Field Temperature Data

TAN Zhimin¹, MA Zhengjun¹, ZOU Xiaoling²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Civil and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the periodicity of the pavement temperature change, an estimation model is built to calculate the instantaneous temperature at any depths of the pavement structure, and also the layer average temperature from the surface to a certain depth. The depth conduction time τ_z being introduced into the model, the discrepancy caused by the temperature conductivity difference of pavement materials is narrowed. According to one-year pavement temperature data collected from Guangzhou, Ningbo and Datong observation stations in China, four parameters of the model are determined to obtain the minimum residual standard

deviation between the calculated temperature and the measured temperature, including the time t_1 of temperature changes in short time and t_2 of baseline temperature changes, attenuation coefficient k_1 of short-term temperature amplitude and k_2 of the baseline temperature amplitude. The fitting results show that the residual standard value between the calculated and the measured temperature is about 1℃, no further than 1.52℃, and the average residual is less than 0.5℃, which proves the estimation model to be precise and applicable.

Key words: pavement engineering; pavement temperature field; pavement surface temperature; mean temperature

正确估计路面温度对于路面设计、施工、养护和检测均具有重要意义^[1]. 对路面温度场的研究已有近百年历史, 早在 1925 年美国就在阿灵顿对沥青路面温度状况进行了观测^[2]; 1957 年美国巴伯(Barber)根据热传导原理和路面温度实测数据研究了路面温度日极值和气温、热辐射等气象参数之间的关系^[3]; 1976 年日本近腾佳宏等^[4]认为路面结构内的温度日极值与气温日极值呈线性关系. 在随后一系列如 SHRP (Strategic Highway Research Program), LTPP (Long-term Pavement Performance) 等研究中提出了很多的路面日最高、最低温度的计算模型^[5-7]; 2000 年美国 Stubstad 等^[8]利用 SMP 项目的沥青路面温度观测数据提出了 Bells2 模型, 预估任意时刻路面结构不同深度处的温度. 在国内, 严作人^[9]和吴赣昌等^[10]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^[11]、孙立军等^[12]、谈至明等^[13]提出了路面结构不同深度温度同多个气象参数之间的回归方程, 这些研究大多以路面结构层温度场实测数据为基础, 采用理论分析或(和)统计手段, 力求建立路面温度日极值(日最高温度、最低温度)

收稿日期: 2012-04-10

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200831800099)

第一作者: 谈至明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路面工程. E-mail: tanjk@online.sh.cn

通讯作者: 马正军(1977—), 男, 博士生, 主要研究方向为路面工程. E-mail: mazhengjundp@163.com

或路面温度日变化规律与气象参数的关系,但由于影响因素众多且规律难寻,迄今尚无精度和普适性均佳的成果;此外,在路面结构温度场实测中路面结构内部温度测量较困难,需预埋温度检测元件,而路表温度的检测十分方便,如采用非接触式远红外温度检测仪,可对路表任一点进行短期或长期的检测.因此,若能依据路表温度估计整个路面结构温度场,对于深化路面结构温度场的研究具有很好的实用价值.

1 路面结构热传导方程和温度数据来源

在已知路表温度条件下层状的路面结构热传导在层间无脱空和热阻时可近似为一维热传导^[1]

$$\begin{cases} \frac{\partial T_i(z,t)}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 T_i(z,t)}{\partial z^2} & i=0,1,2,\dots,m \\ T_1(0,t) = T_s(t) \\ T_i(z_i,t) = T_{i+1}(z_i,t) \\ \lambda_i \frac{\partial T_i(z_i,t)}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(z_i,t)}{\partial z} \\ z_i = \sum_{j=1}^i h_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_i(z,t)$ 为 t 时刻第 i 层路面结构的温度场, $^{\circ}\text{C}$; a_i 为第 i 层路面材料的导温系数, $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$; z 为距路表深度, m ; T_s 为路表温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_i 为第 i 层路面材料的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$; z_i 为第 i 层路面结构层层底深度, m ; h_i 为第 i 层路面结构的厚度, m .

微分方程式(1)可应用差分法求解,但需已知初始时刻的路面温度沿深度分布状况,即 $T(z,0)$,但在实际应用时路表以下的温度初始分布是难以精确估计的.此外,尽管初始温度的估计误差对路面温度求解精度的影响可通过增长其消散时间而降低^[1],但由于缺乏显式且计算过程繁琐,直接用差分法求解微分方程式(1)难以推广和归纳其规律.

因此,基于路面结构温度场实测数据,运用统计方法研究路面结构内部任一点温度与路表温度之间关系,建立显式化的回归方程仍具有很好的实用意义.路面温度场实测数据来源于交通运输部西部交通建设项目“基于多指标的沥青路面结构设计方法研究”课题^[13].该课题的第二分题“路面温度场与当量温度系数研究”在广州、宁波、大同等地设立了沥青路面和水泥混凝土路面结构温度观测站,进行了超过 1 年的连续路面温度观测,温度数据采样间隔

为 1min,而后自动平滑为 10min 间隔以消除数据的异常波动,温度传感器的布设如图 1 所示.

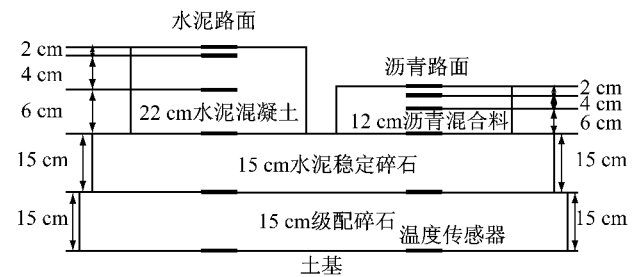


图 1 路面结构及温度传感器埋设示意
Fig.1 Pavement structure and temperature sensor locations

应用差分法解对上述温度数据进行分析,并对面层材料太阳辐射吸收率、长波发射率、长波吸收率以及路面材料的热比、导温系数进行了反算,由于原材料和配合比有所差异,三地的材料热参数不尽相同,表 1 给出了反算得到的沥青混合料和水泥混凝土的导温系数 α .

表 1 各地材料的导温系数

Tab.1 Thermal conductivity of different regions			
地区	沥青混合料	水泥混凝土	水泥稳定碎石
宁波	2.6×10^{-3}	3.1×10^{-3}	3.2×10^{-3}
大同	2.4×10^{-3}	3.0×10^{-3}	3.2×10^{-3}
广州	2.8×10^{-3}	3.2×10^{-3}	3.2×10^{-3}

2 路面任一深度处的温度

从路面结构热传导微分方程式(1)可知,在已知路表温度的条件下,路面结构内部的温度状况取决于历史的路表温度以及材料导热系数和热比.路表是路面结构与大气热流交换的边界,气象因素的任一微小变化,如飘一片云、吹一阵风、下一场雨均会引起路表温度的波动.这种波动会向路面结构深处传递,但波动幅度随着结构深度的增加而衰减,最后趋于平缓.也就是说,路面结构内的任一点温度可视作围绕着基线温度而波动的不规则周期函数,波动可视作由路表温度在短时间内的变化引起的,这个时间长度随着深度增大而增长,但波动幅度随着结构深度的增加而衰减.为了消除材料导温系数不同的影响,将距路表的深度坐标 z 改为路表温度波动传至深度 z 的深度传导时间 τ_z ,深度位于 j 结构层时的深度传导时间 τ_z 的计算式为

$$\tau_z = \sum \left(h_i^2 / \alpha_1 + \dots + \left(z - \sum_{i=1}^{j-1} h_i \right)^2 / \alpha_j \right) \quad (2)$$

式中: j 为路面结构层序号; α_j 为第 j 层路面材料的导温系数, $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$.

路表温度的波动值可用时长 t_1 内的平均值近似, 因此, 采用深度传导时间 τ_z 的任一深度处的路面结构温度 $T(\tau_z, t)$ 的估算模型可表示为

$$T(\tau_z, t) = T_j(\tau_z, t) + [\bar{T}_s(t_1, t) - T_j(\tau_z, t)]k_1 \quad (3)$$

式中: $T_j(\tau_z, t)$ 为深度 z 处的基线温度, $^{\circ}\text{C}$; $\bar{T}_s(t_1, t)$ 为前 t_1 时间段的路表平均温度, $^{\circ}\text{C}$, t_1 为短时温度变化的时长, h , $\bar{T}_s(t_1, t) = \frac{1}{t_1} \int_{t-t_1}^t T_s(u) du$; k_1 为短时温度变幅的衰减系数.

经对路面结构任一深度的基线温度的进一步研究发现, 基线温度也围绕着该处的年均温度作不规则波动的周期函数, 基线温度波动源于中、长期路表温度平均值与年均温度之差, 但波动程度随着深度传导时间 τ_z 增大而衰减.

$$T_j(\tau_z, t) = T_y(\tau_z) + [\bar{T}_s(t_2, t) - T_y(\tau_z)]k_2 \quad (4)$$

式中: $T_y(\tau_z)$ 为年平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t_2 为基线温度变化的时长, h ; k_2 为基线温度变幅的衰减系数.

由于沥青路面和水泥混凝土路面的路表太阳辐射吸收率高于普通裸地土面, 因此, 路面结构内的年平均温度 T_y 高于气象参数之一的裸地年平均温度 $T_{\text{soil}, y}$, 沥青路面约高出 4°C , 水泥混凝土路面约高出 2°C . 因而, 新建道路的路面结构有持续向土基输热的效应, 造成了路面结构年平均温度 T_y 随深度递减现象, 经研究发现, 这种递减现象主要发生于基、垫层, 在沥青和水泥混凝土面层中这种递减现象可忽略不计, 面层结构内的年平均温度与路表温度相差不大. 因而, 路面结构任一深度的年平均温度 $T_y(\tau_z)$ 可用路表年均温度 $T_{s, y}$ 或用裸地年均温度 $T_{\text{soil}, y}$ 加上裸地和路表年均温差 4°C (沥青路面)、 2°C (水泥混凝土

土路面)代替.

按照式(3)和式(4)给出的路面结构任一深度处温度估算模型, 对大同、宁波、广州三地的 2 种路面(沥青路面和水泥混凝土路面)结构的不同深度温度测点的 10 min 间隔温度实测值进行拟合, 以模型计算温度与实测温度之残差的标准差最小为控制目标, 确定模型中 4 个待定参数: t_1, t_2, k_1, k_2 . 拟合结果表明, 时长 t_1, t_2 随深度传导时间 τ_z 的增加而增大, 其中, t_1 与 τ_z 为幂函数关系, t_2 与 τ_z 呈线性关系; k_1, k_2 随 τ_z 的增加而减小, 其中, k_2 随 τ_z 的衰减速度远高于 k_1 随 τ_z 的衰减速度, 如式(5):

$$\begin{cases} t_1 = 3\tau_z^{0.5} \\ t_2 = 6\tau_z + 18 \\ k_1 = 0.84 + 0.16\exp(-0.36\tau_z^{0.5}) \\ k_2 = 0.45 + 0.55\exp(-0.84\tau_z^{0.5}) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以得到, 对于沥青路面的 12 cm 深度而言, $t_1 \approx 7 \text{ h}$, $t_2 \approx 50 \text{ h}$, $k_1 \approx 0.91$, $k_2 \approx 0.55$; 对于水泥混凝土路面的 22 cm 深度处, $t_1 \approx 12 \text{ h}$, $t_2 \approx 110 \text{ h}$, $k_1 \approx 0.87$, $k_2 \approx 0.48$.

表 2 给出了上述 3 个地区 2 种路面不同深度的模型计算温度与实测温度之残差的均值 μ 和标准差 σ . 从表 2 中可以看到, σ 随着路面深度的增加而有所增大, 但最大不超过 1.52°C ; μ 更小, 最大不超过 0.5°C . 这 2 个残差数值在已有国内外路面温度场研究中属非常低的水平. 例如, 在 BELLS2 模型^[8]中, 剔除小于 0°C 、大于 40°C 的数据点后, 其标准差为 1.60°C , 文献[8]中提到路面温度在 $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内的数据点为 3 335 个, 而高于 40°C 的有 387 个数据点, 被剔除的数据达到 10% 以上, 而本文所提出的模型适用于所有路面可能出现的温度, 文献[12]在沥青路面温度场预估模型研究中上海、乌鲁木齐和唐山的标准差为 $2.14 \sim 4.05^{\circ}\text{C}$. 图 2 为路面温度实测值和估计值的对比, 由图可知, 该预估模型具有较高的精度水平.

表 2 路面温度回归残差的均值和标准差

Tab.2 Mean value and standard diffience of regression residual of the pavement temperatures

路面类型	z/cm	大同		宁波		广州	
		$\sigma/^{\circ}\text{C}$	$\mu/^{\circ}\text{C}$	$\sigma/^{\circ}\text{C}$	$\mu/^{\circ}\text{C}$	$\sigma/^{\circ}\text{C}$	$\mu/^{\circ}\text{C}$
沥青混合料	2	0.86	-0.36	0.99	0.24	0.99	0.24
	6	1.12	-0.39	0.97	0.12	0.97	0.12
	12	1.32	-0.44	1.10	-0.07	1.10	-0.07
	27	1.52	-0.46	1.24	-0.13	1.24	-0.13
水泥混凝土	2	0.49	-0.27	0.98	0.50	1.07	0.39
	11	0.85	0.18	0.93	0.31	1.45	0.34
	22	1.04	0.46	1.00	0.30	1.35	0.34
	37	1.29	0.49	0.99	0.14	1.29	0.33

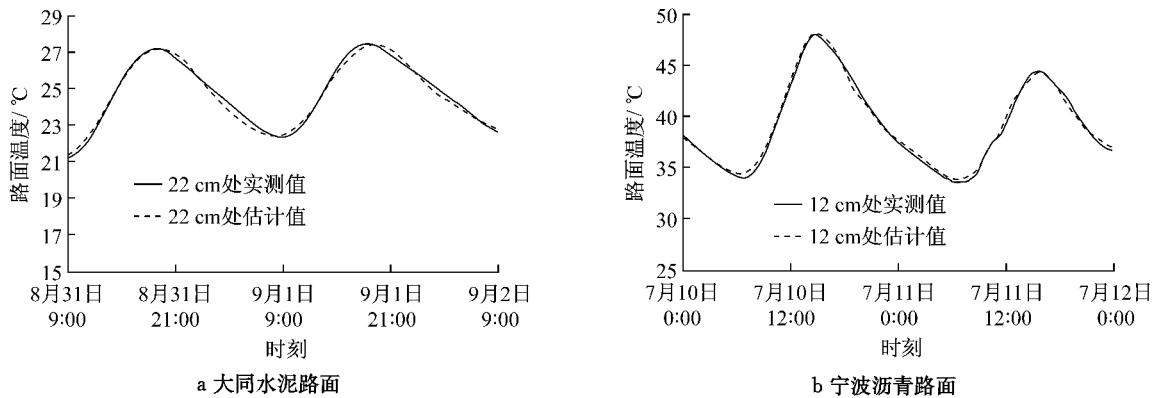


图 2 路面温度实测值与预估值对比

Fig.2 Comparison of the measured and the predicted pavement temperatures

3 路面结构层的平均温度

在实际应用中路面结构层的平均温度往往比某一深度处的温度更为重要,例如,沥青路面的弯沉计算时的沥青面层模量大多取对应于面层平均温度的值,水泥混凝土路面的温度梯度计算时板内平均温度也是一个重要的指标.在已知路面结构任一深度温度 $T(\tau_z, t)$ 条件下,路面结构第 i 层的平均温度 $\bar{T}_i(t)$ 可由下式求得:

$$\bar{T}_i(t) = \frac{1}{\tau_i - \tau_{i-1}} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} T(s, t) ds \quad (6)$$

式中: τ_i 为路表热流传至路面第 i 层层底的传导时间, h.

由于 $\bar{T}_i(t)$ 中含有积分式,直接应用式(5)求解路面结构层的平均温度不太简便.研究发现,路表至任意深度的平均温度 $\bar{T}(\tau_z, t)$ 可采用与路面结构任一深度温度模型的相同形式求解.根据广州、大同、宁波三地 2 类路面结构为期 1 年的温度数据,以 $\bar{T}(\tau_z, t)$ 计算值与实测平均值之残差的标准差最小为原则确定的 4 个待定参数 t_1, t_2, k_1, k_2 的近似回归

关系式为

$$\begin{cases} t_1 = \tau_z^{0.5} \\ t_2 = 2\tau_z + 18 \\ k_1 = 0.84 + (1 - 0.84)\exp(-0.36\tau_z^{0.5}) \\ k_2 = 0.38 + (1 - 0.38)\exp(-0.42\tau_z^{0.5}) \end{cases} \quad (7)$$

与路面结构任一深度的温度的 4 个参数相比,

路表至任意深度的平均温度 $\bar{T}(\tau_z, t)$ 中的时长 t_1, t_2 回归式中的深度传导时间 τ_z 项的系数为前者的 1/3, 而 k_1 与式(5)相同, k_2 也与之较为相近.

表 3 给出了由式(7)4 个待定参数代入式(3)和式(4)得到 $\bar{T}(\tau_z, t)$ 值与实测值之残差的均值 μ 和标准差 σ . 从表中可以看出,路表至任意深度的 μ 和 σ 均很小,保持在 0.5~1.5°C,其数值较 τ_z 深度处的瞬时温度 $T(\tau_z, t)$ 之残差的均值 μ 和标准差 σ 更小,具有良好的精度.图 3 为路面平均温度实测值和估计值的对比,该图表明本文所提出的预估模型具有较高的精度水平.

4 结 语

路面温度变化具有周期性,路面结构内的任一

表 3 路面结构层平均温度回归残差的均值和标准差

Tab.3 Mean value and standard diffience of regression residual of the pavement mean temperatures

路面类型	z/cm	大同		宁波		广州	
		$\sigma/^\circ\text{C}$	$\mu/^\circ\text{C}$	$\sigma/^\circ\text{C}$	$\mu/^\circ\text{C}$	$\sigma/^\circ\text{C}$	$\mu/^\circ\text{C}$
沥青混合料	2	0.51	-0.18	0.59	0.12	0.62	0.31
	6	0.99	-0.35	0.89	0.16	0.97	0.47
	12	1.02	-0.39	0.99	0.12	1.08	0.48
	27	1.42	-0.40	1.16	0.10	1.30	0.46
水泥混凝土	2	0.31	-0.15	0.60	0.30	0.71	0.19
	11	0.61	-0.21	0.93	0.36	1.12	0.34
	22	0.92	-0.18	1.02	0.43	1.35	0.38
	37	1.33	-0.21	1.22	0.50	1.49	0.42

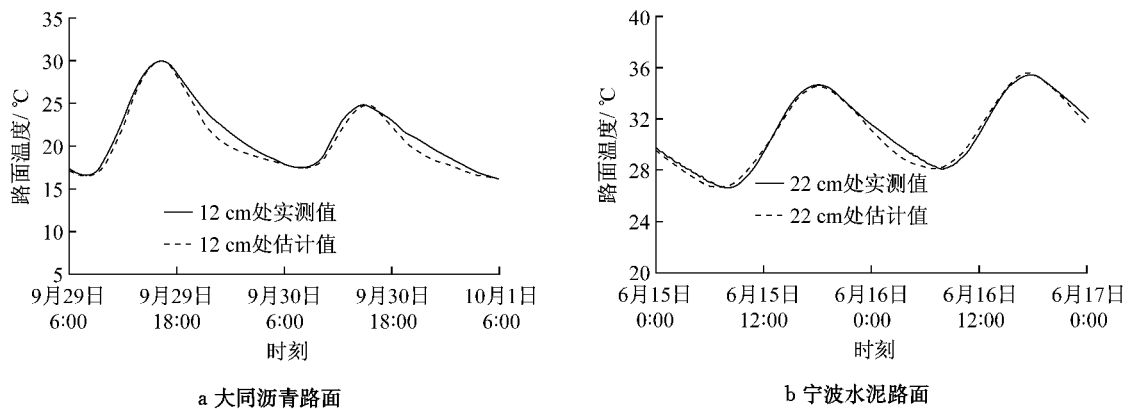


图3 路面平均温度实测值与预估值对比

Fig. 3 Comparison of the measured and the predicted pavement mean temperatures

点温度可视为围绕着基线温度而波动的不规则周期函数,波动是由路表温度在短时间内的变化而引起的,波动幅度随着结构深度的增加而衰减;任一深度的基线温度是围绕着该处的年平均温度作不规则波动的周期函数,基线温度波动源于中、长期路表温度平均值与年均温度之差值,波动程度也随结构深度的增加而衰减。据此建立了根据路表温度推算路面结构任一深度温度与自路表至某一深度的层平均温度的估算模型,估算模型中包含了4个待定参数:短时温度变化的时长 t_1 、基线温度变化的时长 t_2 、短时温度变幅的衰减系数 k_1 、基线温度变幅的衰减系数 k_2 ,并通过引入热流传导时间 τ_c 以消除路面材料导热系数不同引起的差异。采用广州、宁波、大同三地的路面结构温度场观测站为期1年的路面温度实测数据,回归标定上述4个参数,结果表明,2类路面即沥青、水泥混凝土路面不同深度温度的模型估计值与实测值之残差的标准差最大不超过 1.52°C ,残差的均值不超过 0.5°C ,自路表至某一深度的层平均温度的模型估计精度较前者更好一些。

参考文献:

- [1] 谈至明,邹晓翎,刘伯莹. 路面温度场的数值解及几个关键问题探讨[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(3): 374.
TAN Zhiming, ZOU Xiaoling, LIU Boying. Numerical solution to pavement temperature fields and discussion on several key issues[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010,38(3):374.
- [2] Barber E S. Calculation of maximum pavement temperature from weather reports[R]. Washington D C: National Research Council, 1957.
- [3] Huber G A. Weather database for the SPERPAVE mix design system[R]. Washington D C: National Research Council, 1994.
- [4] Kennedy T W, Huber G A, Harrigan E T, et al. Superior performing asphalt pavements (superpave): the product of the SHRP asphalt research program [R]. Washington D C: National Research Council, 1994.
- [5] Mohseni A, Symons M. Improved AC pavement temperature models from LTPP seasonal data[C/CD]// TRB 77th Annual Meeting, Washington DC: TRB, 1998.
- [6] Robertson W D. Determining the winter design temperature for asphalt pavement[M]. Charleston: Association of Asphalt Paving Technologist, 1997.
- [7] ERES Consultants Division of ARA Inc. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2004.
- [8] Lukanen E O, Stubstad R, Briggs R C. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2000.
- [9] 严作人. 层状路面温度场分析[D]. 上海:同济大学,1982.
YAN Zuoren. Analysis of temperature field in multi-layer pavement[D]. Shanghai: Tongji University, 1982.
- [10] 吴贛昌, 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.
- [11] 许世法. 沥青路面温度分布规律的研究[J]. 北京公路, 1991, 14(5):43.
XU Shifa. Study on asphalt pavement temperature distribution pattern [J]. Beijing Highways, 1991, 14(5): 43.
- [12] 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, QING Jian. Model of prediction of asphalt pavement temperature fields [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(4):480.
- [13] 谈至明,邹晓翎,马正军,等. 基于多指标的沥青路面结构设计方法研究——路面温度场与当量温度系数研究[R]. 上海:同济大学,2011.
TAN Zhiming, ZHOU Xiaoling, MA Zhengjun, et al. Study of method of asphalt pavement structure design based on multi-index: research on pavement temperature field and equivalent temperatures[R]. Shanghai: Tongji University, 2011.