

文章编号:1671-8879(2015)03-0040-06

路面温度日变化曲线的拟合

邹晓翎¹,谈至明²,钱 晨²,唐伯明¹

(1. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室,重庆 400074;

2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘 要:为了分析路面温度日变化特征,基于广州、宁波、大同 3 个地区为期 1 年的地面气象资料 and 水泥、沥青路面的实测温度,在分析路表温度分布特征的基础上,建立了基于晴天的路表温度日变化的二阶段拟合模型,通过引入修正系数 ξ 对多云天气路表温度日变化模型进行了修正;不同深度处路面温度日变化的拟合通过对路表温度日变化模型的日最高、日最低温度出现时刻及二阶段交接点时刻作相应的滞后调整。最后进行了实测数据检验。研究表明:水泥和沥青路表温度拟合值与实测值之间的偏差平均值 $Av.$ 为 $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$,均方根误差 $ST.$ 为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;不同深度处水泥路面和沥青路面日温度变化拟合值的 $Av.$ 为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $ST.$ 小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$;研究结果可作为路面温度场热传导方程的上边界条件,为路面温度区划提供依据。

关键词:道路工程;温度场;日最高温度;日最低温度;拟合分析

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Curve fitting of diurnal temperature variations in pavements

ZOU Xiao-ling¹, TAN Zhi-ming², QIAN Chen², TANG Bo-ming¹

(1. National & Local United Engineering Laboratory of Transportation and Civil Engineering Materials,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Road and

Traffic Engineering of the State Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: By using the measured data of temperatures in asphalt and concrete pavements placed at meteorological observation stations in Guangzhou, Ningbo and Datong cities as well as corresponding meteorological reports over 1 year, the characteristics of road surface temperatures were analyzed, and a two-phase fitting model for road surface temperatures was established upon diurnal temperature variations in pavements in sunny days. A coefficient ξ was introduced to modify the model of diurnal temperature variations in pavements in cloudy days. The diurnal temperature variations in pavements at different depths were well fitted through a back-shifting adjustment of the occurrence times of the minimum, maximum pavement temperatures and the joint point of two phrases. The verifications show that between measured temperatures and computed temperatures on road surface, the average errors $Av.$ are $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the root-mean-square errors $ST.$ are $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; at different depths the average errors $Av.$ are $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the root-mean-square errors $ST.$ are below $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ accordingly. The research

收稿日期:2014-10-20

基金项目:中国博士后科学基金面上资助项目(2012M511910);交通运输部西部交通建设科技项目(2008 318 000 99);

重庆交通大学交通土建工程材料国家地方联合工程实验室开放基金项目(LHSYS-2012-008)

作者简介:邹晓翎(1978-),男,江西安福人,副教授,工学博士,E-mail:zouxiaoling2775@126.com。

results can be used as input of upper boundary conditions for heat conduction equations and as basis for pavement temperature zoning. 3 tabs, 6 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; pavement temperature field; daily maximum temperature; daily minimum temperature; simulation analysis

0 引言

路面温度既表征太阳辐射对道路的作用,也表征路面介质的热传导和材料的热性质,包括路面类型、水分状况与水热收支特征等^[1]。研究路面温度的日变化特征对辐射平衡、道路温度场模拟^[2]及验证具有重要意义。Barber 根据 Hybla Valley (Virginia, USA) 的路面温度实测数据,粗略地采用正弦曲线来拟合路面温度的日变化情况^[3];严作人等分别采用单次正弦曲线、Fourier 级数展开以及三次正弦叠加来拟合路面温度^[4-6]。虽然多次正弦叠加或 Fourier 级数能更好地趋近路表日最高温度和日最低温度,但相邻日间的终止和起始时刻间的温度不连续。Viljoen 通过正弦函数和指数函数来拟合路面不同深度处的日间和夜间温度变化,对晴天路表温度的拟合效果较好,但由于其正弦函数的角频率和日最低温度出现时刻为定值,不能适用于多云天气和不同深度处的路面温度拟合^[7]。此外,国内外许多学者借助各种气象参数,利用经验法或理论分析法来推算路面温度的日变化,但从其拟合结果

来看并不能达到令人满意的精度^[8-13]。为此,本文建立日间连续的并能反映不同天气条件及不同深度路面温度日变化规律的路面温度拟合模型。

1 资料来源

分析资料来自于广州、宁波、大同 3 个地区标准气象观测场的地面气象和路面温度观测资料。气象要素观测资料按照《地面气象观测规范》(完全版 20081221)要求收集,文中用到的云量、降雨量、日照时数等气象要素数据取自月报表的统计数据;路面温度资料来自于标准气象观测站内设置的水泥、沥青 2 种路面结构试验块中的温度实测数据,温度传感器采用国家气象观测站标准的 PT100 地温传感器,在-50℃~50℃范围内最大误差为±0.2℃,大于 50℃的最大误差为±0.3℃;为了消除传感器精度引起的数据波动,路面温度取 10 min 均值数据。各测站的地理信息及数据来源信息见表 1。3 个测站采用的路面结构相同,路面结构和温度传感器埋设如图 1 所示。

表 1 数据来源
Tab. 1 Data source

测站	地理位置	数据时段	传感器距路表深度/cm						
广州	E113°19′、N22°56′、海拔 12.3 m	2009-07~2010-06	水泥路面	0	2	6	12	27	42
宁波	E121°33′、N29°47′、海拔 5.0 m	2009-05~2010-05							
大同	E113°20′、N40°06′、海拔 1 067.2 m	2009-07~2010-06	沥青路面	0	2	11	22	37	52

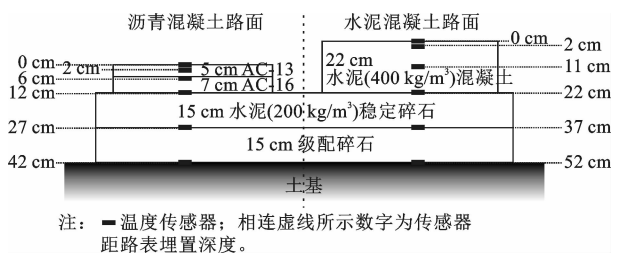


图 1 各测站的路面结构和温度传感器埋设
Fig. 1 Pavement structure and temperature sensors layout

2 路表温度的日变化特征

下页图 2 给出了晴天、多云、阴雨 3 种典型天气

条件下,广州、宁波、大同等不同地区水泥路面和沥青路面的路表温度日变化曲线。需要指出的是,本文所指的晴天、多云、阴雨天气条件,并非以气象学上的云量作为划分标准,而是采用与云量关系十分密切的日照率 S ($S \geq 80\%$ 为晴天; $S = 0$ 为阴雨天; $0 < S < 80\%$ 为多云)来区分。为了消除不同经度地区日出时刻不一致,图中横坐标采用当地标准时间 (LST)。图 2 给出广州、宁波、大同 3 地的晴天日照率分别为 92.6%(广州,2009-07-12)、93.7%(宁波,2009-07-17)、98.8%(大同,2009-07-25);多云日照率分别为 17.3%(广州,2009-07-29)、11.7%(宁波,2009-07-07)、20.5%(大同,2009-08-18);雨天日照

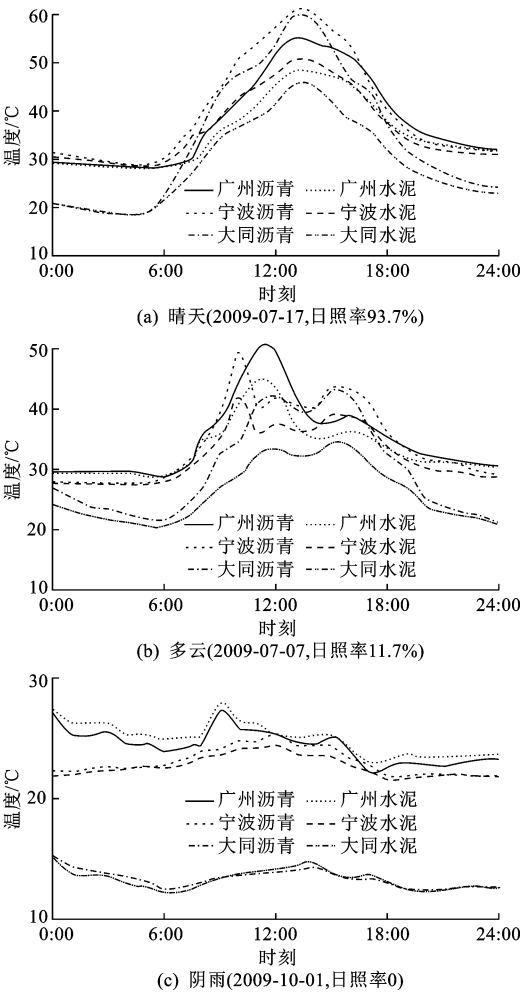


图 2 3 种典型天气条件下的路表温度日变化规律
Fig. 2 Diurnal temperature variations of road surface under three typical weather conditions

率分别为 0.6% (广州, 2009-10-20)、0.5% (宁波, 2009-10-01)、0 (大同, 2009-09-06)。由图 2 可以看出: 各地区水泥混凝土路面与沥青混凝土路面的路表温度日变化趋势相同, 日最高、最低温度的出现时刻相同, 夜间两者的路表温度非常接近, 而在白天沥青路面的路表温度明显高于水泥路面的路表温度, 晴天时尤为显著, 其原因是沥青材料的太阳辐射吸收率较高; 晴天路表温度的升温过程及高温区段呈正弦函数状, 降温过程在日落后较快, 夜间较为缓慢; 多云天气白天时段云的出现遮挡了阳光, 路表吸收的太阳辐射量减小, 使得路表的增温幅度下降, 由于天空中的云量出现时间具有随机性, 因而路表白天的增温段波动比较大, 最高温度的出现时间具有不确定性; 阴雨天时, 由于日照率为 0, 路表吸收到的仅为太阳光透过云层时产生的散射辐射, 水泥路表和沥青路表白天时段的增温幅度较小, 两者的日较差比较接近。

3 路表温度日变化规律的拟合

路表温度日变化规律采用二阶段法拟合, 如图 3 所示。白天升温过程及高温区段采用余弦函数, 降温过程采用负指数函数表征

$$T_s(t) = \begin{cases} \frac{T_{s,h} + T_{s,l}}{2} - \frac{T_{s,h} - T_{s,l}}{2} \cos(\pi \frac{t - t_{s,l}}{t_{s,h} - t_{s,l}}) & t_{s,l} \leq t < t_{s,c} \\ (T_{s,c} - A)e^{-\beta_s(t - t_{s,c})} + A & t_{s,c} \leq t < t_{s,l}^+ + 24 \end{cases} \quad (1)$$
$$A = \frac{T_{s,l}^+ - T_{s,c}e^{-\beta_s(t_{s,l}^+ + 24 - t_{s,c})}}{1 - e^{-\beta_s(t_{s,l}^+ + 24 - t_{s,c})}}$$

式中: $T_{s,l}$ 为路表日最低温度(°C); $T_{s,h}$ 为路表日最高温度(°C); $t_{s,l}$ 为路表日最低温度出现时刻; $t_{s,h}$ 为路表日最高温度出现时刻; $t_{s,c}$ 为二阶段交接时刻; $T_{s,c}$ 为二阶段交接时刻的路表温度, 用 $t_{s,2}$ 代入第 1 阶段方程求得; $t_{s,l}^+$ 为第 2 天路表最低温度出现时刻; $T_{s,l}^+$ 为第 2 天路表最低温度(°C); β_s 为降温速率的参数。

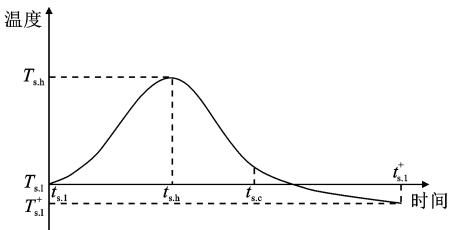


图 3 路表温度日变化拟合
Fig. 3 Curve fitting for diurnal temperature in road surface

路表日最低温度出现时刻 $t_{s,l}$ 的统计结果(图 4)表明: 路表日最低温度集中出现在日出时刻 $t_{sunrise}$ (当地标准时间) 前后, 路表日最低温度出现在 $t_{sunrise} \pm 0.5$ h 时段内的频率, 晴天接近 90%, 多云天为 45%, 阴雨天为 39%, 因此路表日最低温度出现时

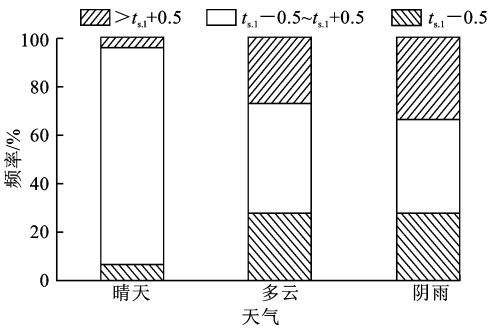


图 4 路表日最低温度出现时刻的频率
Fig. 4 Frequency of occurrence time with daily minimum temperature

刻 $t_{s,1}$ 可取日出时间 t_{sunrise} ; 路表日最高温度出现频率最大的时间段为 12:30~13:30, 晴天在 85% 以上, 多云天达 48%, 阴雨天为 58%, 见图 5; 路表日最高温度出现时刻 $t_{s,h}$ 可近似取 13:00。

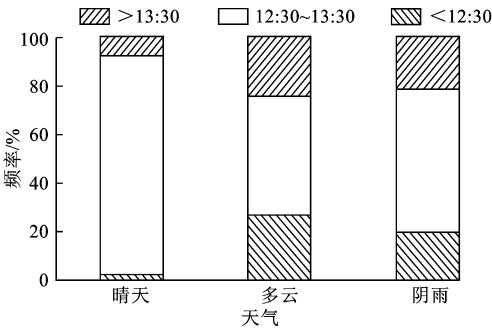


图 5 路表日最高温度出现时刻的频率
Fig. 5 Frequency of occurrence time with daily maximum temperature

二阶段交接点时刻 $t_{s,c}$ 约为路表热通量平衡点的出现时间, 其值随地区(经纬度)、季节差异而变化。经分析, $t_{s,c}$ 出现在日落前 $1/6$ 日长 t_{daytime} 对应

表 2 路表温度拟合值与实测值偏差(实测值-拟合值)的统计结果

路面类型		晴天		多云		阴雨天		所有数据(未修正)		所有数据(修正后)	
		Av. /℃	ST. /℃	Av. /℃	ST. /℃	Av. /℃	ST. /℃	Av. /℃	ST. /℃	Av. /℃	ST. /℃
沥青路表	广州	0.34	0.77	-0.92	2.61	-0.36	0.85	-0.70	1.82	-0.24	0.92
	宁波	-0.20	0.68	-1.63	2.82	0.15	0.82	-0.97	2.18	-0.11	0.99
	大同	-0.16	0.55	-0.59	2.71	-0.22	0.73	-0.39	2.09	0.11	0.87
水泥路表	广州	0.25	0.96	-1.08	2.51	0.05	0.76	-0.75	2.01	-0.22	0.98
	宁波	-0.14	0.96	-0.96	2.79	-0.08	0.95	-0.68	2.32	-0.10	0.85
	大同	-0.08	0.75	-0.89	1.93	-0.13	0.48	-0.60	1.76	0.07	0.84
平均值		0.00	0.78	-1.01	2.56	-0.10	0.77	-0.68	2.03	-0.08	0.91

4 多云天气的修正

图 6 给出了 2010 年 5 月 6 日多云天气条件下(日照率 S 为 18.3%) 宁波沥青路表的拟合情况。从图 6 可以看出: 从日出时刻开始到日最高温度出现时刻, 以及日最高温度出现时刻到二阶段交接时刻, 由于云层随机性地出现, 遮挡了路表对太阳辐射量的吸收, 实测温度曲线的波动较大, 而拟合线按正弦曲线规律上升, 造成拟合曲线所围成的面积大于实测曲线所围成的面积。因此, 对于多云天气条件下的路表温度拟合公式需要进行适当的修正。

路表温度的日平均温度的物理意义是日变化曲线与时间轴围成的面积, 它可间接反映进出路表的热通量, 其偏差将带来系统性的影响, 应予以修正。为此, 引入多云天气修正系数 ξ , 通过修正路表日最

的时刻, 即 $t_{s,c} = t_{\text{sunset}} - \frac{t_{\text{daytime}}}{6}$ 。

降温速率参数 β_s 与降温总量和云量等因素有关, 统计结果表明, β_s 可近似表示为

$$\beta_s = 0.07 \ln(T_{s,h} - T_{s,1}^+) \quad T_{s,h} > T_{s,1}^+ + 1 \quad (2)$$

表 2 给出了各测站路表温度所有 10 min 间隔数据拟合值与实测值之间偏差的统计结果。由表 2 可以看出, 各个测站所有数据的路表温度拟合值与实测值之间的平均偏差 Av. 为 -1.0℃~-0.3℃, 均方根误差 ST. 为 0.9℃~2.5℃。其中, 晴天和阴雨天的 Av. 为 -0.4℃~0.4℃, ST. 为 0.5℃~1.0℃, 说明各测站晴天和阴雨天的拟合值与实测值能较好地吻合; 但对于多云天气, 拟合值与实测值之间 Av. 为 -1.7℃~-0.5℃, ST. 为 1.9℃~2.8℃, 说明多云天气的路面温度拟合值普遍高于实测温度, 且拟合值与实测值之间的偏差较大。因此, 对于多云天气条件下的路表温度拟合公式需要进行适当的修正^[14]。

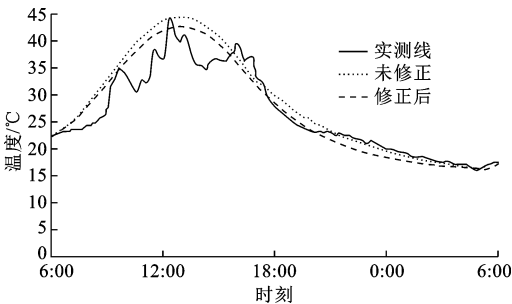


图 6 多云天气条件下路表温度拟合值与实测值(2010-05-06, 宁波沥青路面)
Fig. 6 Simulated and measured road surface temperature for cloudy weather condition(2010-05-06, asphalt pavement, Ningbo station)

高温 $T_{s,h}$, 使其拟合曲线的日平均温度与实际值相同。即, 多云天气修正系数 ξ 的定义式为

$$\xi = \frac{T_{s,m} - (T_{s,1} + T_{s,1}^+)/2}{\hat{T}_{s,m} - (T_{s,1} + T_{s,1}^+)/2} \quad (3)$$

$$T_{s,m}=\frac{1}{24}\int_{t_{s,l}}^{t_{s,l}^{+}+24}T_s(\tau)d\tau,\hat{T}_{s,m}=\frac{1}{24}\int_{t_{s,l}}^{t_{s,l}^{+}+24}\hat{T}_s(\tau)d\tau$$

式中： $T_{s,m}$ 为实测的路表日平均温度； \hat{T}_s 为修正前的路表温度拟合值； $\hat{T}_{s,m}$ 为修正前的路表日平均温度拟合值。

修正后的路表日最高温度 $\hat{T}_{s,h}$ 的计算式为

$$\hat{T}_{s,h}=T_{s,l}+\xi(T_{s,h}-T_{s,l})\tag{4}$$

综合广州、宁波、大同 3 个气象要素资料齐全测站的分析,多云天气修正系数 ξ 可用日照率来表达

$$\xi=\begin{cases} 1 & S\geqslant 0.8 \\ 0.9+S/8 & 0<S<0.8 \end{cases}\tag{5}$$

$$S=\frac{t_{sun}}{t_{daytime}}\tag{6}$$

$$t_{daytime}=\frac{2}{15}\arccos[-\tan(L)\tan(\varphi_{sun})]$$

式中： t_{sun} 为实际日照时间(h)； $t_{daytime}$ 为日长(h)； L 为纬度； φ_{sun} 为太阳偏角(°)。

为了便于比较多云天气修正前后的拟合精度,表 2 最后一列给出了广州、宁波、大同 3 个测站修正后拟合值与实测值的统计结果。从表 2 可以看到,各测站水泥路表和沥青路表所有 10 min 数据拟合偏差的平均值 Av. 从修正前的一 0.68 ℃ 削减为修正后的一 0.08 ℃,减幅 88%;ST. 由 2.03 ℃ 降为 0.91 ℃,减幅

55%,采用修正后的拟合公式具有足够的精度^[14-15]。

5 不同深度处路面温度日变化规律

与路表温度日变化规律类似,不同深度处的路面温度日变化 $T(t,z)$ 也可用式(1)的二阶段模型进行拟合。但是,路面结构的日最低温度出现时刻 t_l 、日最高温度出现时刻 t_h 、二阶段分界时刻 t_c 均比路表温度的 $t_{s,l}$ 、 $t_{s,h}$ 、 $t_{s,c}$ 延后,统计表明, t_l 、 t_h 、 t_c 可近似表示为

$$\begin{aligned} t_l(z) &= t_{s,l} + 2\Delta t(z) \\ t_h(z) &= t_{s,h} + 3.5\Delta t(z) \end{aligned}\tag{7}$$

$$t_c = t_{s,c} + 3\Delta t(z)$$

$$\Delta t(z) = z\sqrt{\frac{\pi}{24\alpha}}$$

式中： $\Delta t(z)$ 为理论滞后时间(h)； α 为材料导温系数(m^2/h)。

表 3 给出了广州、宁波、大同 3 个测站不同深度处水泥路面和沥青路面温度日变化的拟合误差。由表 3 可见,各测站的沥青路面、水泥路面实测值与拟合值之间偏差的平均值均在一 0.5 ℃~0.5 ℃ 之间,标准差小于 2 ℃。不同路面类型(水泥路面、沥青路面)不同深度处的 Av. 值和 ST. 值的分布趋于随机,且各观测站的 Av. 值和 ST. 值无明显的差异,表明拟合公式有较高的精度和适用性。

表 3 不同深度路面日温度变化拟合误差(实测值-拟合值)

Tab. 3 Statistical results of simulated and measured daily pavement temperature at different depths

测站	不同深度水泥路面						不同深度沥青路面					
	2 cm		11 cm		22 cm		2 cm		6 cm		12 cm	
	Av./℃	ST./℃	Av./℃	ST./℃	Av./℃	ST./℃	Av./℃	ST./℃	Av./℃	ST./℃	Av./℃	ST./℃
广州	-0.23	1.27	-0.12	1.81	0.06	1.39	-0.31	1.09	-1.02	1.44	-0.29	1.10
宁波	-0.15	1.72	-0.21	1.33	-0.12	0.64	0.19	1.46	-0.33	1.30	0.05	0.90
大同	0.18	1.19	0.23	1.24	0.13	0.16	-0.26	1.13	-1.33	1.19	0.40	1.21

6 结 语

(1)水泥混凝土路面与沥青混凝土路面的路表温度日变化特征的大致趋势相同,日最高温度和日最低温度的出现时刻相同,夜间两者的路表温度非常接近,而在白天沥青路面的路表温度明显高于水泥路面的路表温度,晴天时尤为显著,多云天气次之,阴雨天两者温度接近。统计晴天的数据发现,各地水泥路表和沥青路表的日最低温度出现在日出前后 0.5 h 时段内的频率达 90% 以上,日最高温度出现在 12:30~13:30 时段内的频率达 85% 以上。

(2)基于晴天路表温度的分布特征,路表温度日变化采用二阶段函数进行拟合,日出时刻至日落前

2 h 左右,路表温度处于升温过程及高温区段,采用正弦函数来表征;日落前 2 h 后,路表温度处于降温过程,且在日落前后降幅较快,夜间较为缓慢,该阶段采用负指数函数进行表征。

(3)多云天气时,路表吸收的太阳直接辐射量减小,使拟合曲线所围成的面积大于实测曲线所围成的面积,且最高温度出现在 13:00 左右的频率降低,可以通过多云天气修正系数 ξ 对基于晴天的路表温度拟合模型进行修正,与修正前的数据比较,修正后的拟合值与实测值之间 Av. 降幅达 88%,ST. 降幅达 55%。

(4)不同深度处的路面温度日变化规律与路表温度日变化规律类似,仅需对二阶段模型第 1 阶段

余弦函数的角频率、日最低温度起始时间、日最高温度出现时刻及二阶段分界时刻随深度的增加作相应的延后,降温区间时长作相应的调整即可。经广州、宁波、大同3个测站的实测数据检验,不同深度处水泥路面和沥青路面日温度变化拟合值的 A_v 为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ST 小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明不同深度处的路面温度日变化拟合模型具有较高的精度。

参考文献:

References:

- [1] 王民燕,吕达仁. GMS 5 反演中国几类典型下垫面晴空地表温度的日变化及季节变化[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 957-968.
- WANG Min-yan, LU Da-ren. Diurnal and seasonal variation of clear-sky and surface temperature of several representative and surface types in china retrieved by GMS 5 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 957-968. (in Chinese)
- [2] 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): 374-379.
- TAN Zhi-ming, ZOU Xiao-ling, LIU Bo-ying. Numerical solution to pavement temperature fields and discussion on several key issues[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(3): 374-379. (in Chinese)
- [3] Barber E S. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports[J]. Highway Research Board Bulletin, 1957, 168(2): 1-8.
- [4] 严作人. 层状路面温度场分析[D]. 上海: 同济大学, 1982.
- YAN Zuo-ren. Analysis of temperature field in multilayer pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 1982. (in Chinese)
- [5] 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): 21-28.
- WU Gan-chang, LING Tian-qing. The analysis of developing mechanism of thermal crack of the semi-rigid roadbase[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(1): 21-28. (in Chinese)
- [6] 谈至明,孙立军. 路面结构低温状况分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 1999, 27(5): 520-525.
- TAN Zhi-ming, SUN Li-jun. Low temperature condition of pavement structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(5): 520-525. (in Chinese)

- [7] Viljoen A W. Estimating asphalt temperature from air temperatures and basic sky parameters[R]. Pretoria: CSIR, 2001.
- [8] 康海贵,郑元勋,蔡迎春,等. 实测沥青路面温度场分布规律的回归分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 13-18.
- KANG Hai-gui, ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-chun, et al. Regression analysis of actual measurement of temperature field distribution rules of asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 13-18. (in Chinese)
- [9] Yilmaz H, Toy S, Lrmak M A, et al. Determination of temperature differences between asphalt concrete, soil and grass surface of city of Erzurum, Turkey[J]. Atmosfera, 2008, 21(2): 135-146.
- [10] Velasquez R, Marasteanu O M, Clyne T R, et al. Improved model to predicted flexible pavement temperature profile[C]//CEDEX. Third International Conference on Accelerated Pavement Testing. Madrid: CEDEX 2008: 1-14.
- [11] Mohammad Z. Alavi, Mohammad R. P., Elie Y. Hajj. Prediction of asphalt pavement temperature profile using the finite control volume method[C]//TRB. The 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2014: 1-25.
- [12] Hui L, John H. Numerical simulation and sensitivity analysis of asphalt pavement temperature and near-surface air temperature using integrated local modeling [C]//TRB. The 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2010: 1-20.
- [13] Wang D. Analytical approach to predict temperature profile in a multilayered pavement system based on measured surface temperature data [J]. Journal of Transportation Engineering; American Society of Civil Engineering, 2012, 138(5): 674-679.
- [14] 邹晓翎,谈至明,钱晨. 路面结构层温度特征值的估计[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012, 40(7): 1041-1045.
- ZOU Xiao-ling, TAN Zhi-ming, QIAN Chen. Estimation of characteristic temperatures in pavement structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(7): 1041-1045. (in Chinese)
- [15] Ake H. Mathematical model for paved surface summer and winter temperature; comparison of calculated and measured temperatures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004(40): 1-17.