

# 半刚性基层沥青路面温度场的解析理论\*

吴赣昌<sup>1</sup>

(王洪纲推荐, 1995年3月23日收到, 1996年5月13日收到修改稿)

## 摘 要

本文从气象学和传热学的基本原理出发, 采用解析理论建立了完全依赖气象站标准气象资料的二维非线性路面温度场的计算理论, 并对不同气候条件下路面温度、土基温度及沿厚度变化的温度分布给出了相应的计算方法。

**关键词** 沥青路面 温度场 太阳辐射 热传导

## 一、引 言

路面结构完全处在自然环境的影响中, 经受着持续变化的大气影响, 如太阳辐射、天空辐射及外界气温的影响。太阳辐射与天空辐射的一部分从路表面被反射, 余下的部分被吸收并转变为热能。这部分热能与外界气温相叠加, 由此产生的可观的路表温度, 从而产生热传导作用, 主要为沿路面厚度传向温度较低处, 由于在一天内不断变化的表面温度, 就产生了不稳定热流。路面使用实践表明: 路面温度状况对路面结构的承载强度和使用效果有重要的影响, 如高温导致沥青面层产生车辙, 低温导致路面缩裂等。路面温度场研究的目的在于指导路面设计人员针对本地的具体情况采取措施以保证路面在不利温度条件下具有足够的高温稳定性和较好的低温抗裂性。

确定路面结构的温度场, 最直接的手段是在各地广泛地进行路面温度实地观测, 这种实测工作必须对全国范围内有代表性的地区进行。然而它们需要耗费大量的人力、物力和时间。而且即使全年进行这种实测, 遇到极端温度的可能性也很小。因此, 根据路面结构所处的地区, 借助已有的标准气象资料来掌握确定路面温度场, 就具有重要的理论和实用意义。

几十年来, 国内外道路研究人员在路面温度场的理论方面做了大量的工作, 在采用的方法上大致可归纳为以下两类: 1. 在实测数据的基础上, 采用概率统计方法进行研究; 2. 采用半解析法和简化的计算模型对路面温度的某些特征进行研究。这些方法的不足之处在于: ①过多依赖实测; ②分析结果有局限性; ③估计误差较大。

本文从气象学和传热学的基本原理出发, 采用解析理论建立了二维非线性不稳定路面温度场的计算方法, 该方法易于形成应用软件, 并可普遍推广应用以替代路面温度实测。

\* “八五”国家重点科技攻关项目85—403—02—02

<sup>1</sup> 佛山大学数学系, 广东佛山 528000

## 二、基本方程

根据沥青路面结构的实际情况, 研究由 $n$ 层不同材料组成的层状路面结构的温度场问题。假设路面结构中的温度分布与道路长度无关, 则路面温度场可按平面热传导问题进行研究。取与路线方向垂直的一个截面作代表, 设该截面的水平方向为 $x$ 轴, 垂直向下方向为 $y$ 轴正向, 作成平面直角坐标系。假设路面结构第 $i$ 层的导热系数为 $\lambda_i$ 、导温系数为 $a_i$ 、厚度为 $g_i$ ( $g_n = \infty$ )、温度函数为 $T_i = T_i(x, y, t)$ , 则在路面结构内部 $T_i(x, y, t)$ 满足热传导方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), & 0 \leq y \leq h_0 \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), & h_0 \leq y \leq h_1 \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} &= a_n \left( \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} \right), & h_{n-2} \leq y \leq \infty \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

式中 $t$ 为时间变量, 而 $h_0 = g_1$ ,  $h_k = \sum_{i=1}^{k-1} g_i$ .

在高等级公路的柔性路面结构中, 一般路面结构各层粘结良好, 则在层间接触上下二层的温度和热流是连续的, 即在层间界面上温度函数 $T_i$ 满足传热学中的第四类边界条件

$$T_i = T_{i-1}, \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \lambda_{i-1} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial y} \quad \text{在层间界面 } y = h_{i-1} \text{ 上} \quad (2.2)$$

此外, 解必须满足有界性条件, 即

$$|T(x, y, t)| \leq M, \quad \text{当 } y \rightarrow \infty \text{ 时} \quad (2.3)$$

式中 $M$ 为常数。

最后, 我们来研究在温度函数 $T(x, y, t)$ 在路表面 $y=0$ 应满足的边界条件。

传导、对流、辐射是组成路表热量平衡的三种基本传热方式。设 $R$ 表示路表面各项辐射热量的总和, 气候学中称它为路表辐射差额; 设 $P$ 表示空气与路表面之间的对流交换热量; 而 $q$ 表示路表面按导热方式输送给路面体的热量; 规定辐射和对流使路表面得到热量为正, 导热使路表面以下路面体得到热量为正。对任一瞬间路表面得到的外界能量为 $R+P$ , 并将这部分能量以导热方式输送给路面体。从而有下列平衡方程式:

$$q = R + P \quad (2.4)$$

式中 $q$ ,  $P$ ,  $R$ 的单位为瓦特/平方米·小时, 记为 $W/m^2 \cdot h$ 。

利用传热学中的基本定律, 按文[1]中的方法, 易建立路表边界条件

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = B \left[ f(x) \left( T_a + \frac{a_s Q - F}{B} \right) - T_1 \Big|_{y=0} \right] \quad (2.5)$$

式中 $Q$ 是太阳总辐射(单位是 $MJ/m^2$ ),  $a_s$ 是路表面对太阳总辐射的吸收率,  $F$ 是有效辐射(单位是 $W/m^2$ ),  $B$ 是路表热交换系数(单位是 $W/m^2 K$ ),  $T_a$ 是气温, 以绝对温度 $K$ 计。

假定系数 $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $a_s$ ,  $B$ 等是已知常数, 路表有效辐射 $F$ 可通过对太阳辐射或外界气温的折减来近似计算, 则上述路面温度场问题可归结为一个偏微分方程的线性边值问题, 其计算

方法已在文[1]和[2]中得到解决。然而,路面温度实测与计算的比较研究表明:采用上述假定只能进行粗略的路面温度估计,无法对路面温度日变化过程和路面温度分布作比较深入和准确的分析。事实上,路表热交换系数 $B$ 、路表有效辐射 $F$ 都是与路表温度等紧密相关的变量,这表明边界条件(2.5)是非线性的,下面将对此进行分析。

首先,根据热辐射的基本原理<sup>[2][3]</sup>,路表热交换系数 $B$ 可表达为

$$B = C_p K_p + 2.6(\sqrt{\Delta T} + 1.5v) \quad (2.6)$$

$$K_p = (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3) / 10^8 \quad (2.7)$$

式中 $\Delta T$ 是路表温度与周围空气温度的差值(K), $v$ 是靠近路表面的风速(m/s), $C_p$ 是与物质表面的辐射系数有关的常数<sup>[2][3]</sup>, $T_1$ , $T_2$ 分别是发生辐射热交换的两种介质的温度。

其次,根据热辐射的基本原理,路面有效辐射 $F$ 可表达

$$F = \varepsilon_u(1 - \varepsilon_a)C_s(T_0/100)^4 \quad (2.8)$$

式中 $T_0$ 是路表温度, $\varepsilon_u$ 是路面辐射系数, $\varepsilon_a$ 是大气的辐射系数, $C_s$ 是黑体的辐射系数( $C_s = 5.775\text{W/m}^2\text{K}^4$ )。

在已往的研究中,由于路表有效辐射的实测和计算均比较困难,一般都通过适当改变热交换系数、修正温度过程<sup>[4]</sup>或对太阳辐射作一折减来近似估计路表有效辐射的释热效果<sup>[5]</sup>,显然,这些近似估计会导致较大的误差。

此外,太阳辐射是使路面增温的重要因素。完全晴天时太阳辐射总量的日过程曲线与正弦半波相似<sup>[5]</sup>,我国同济大学的严作人等在已知太阳辐射日总量的情况下采用余弦函数的Fourier级数对太阳辐射的日分布进行了模拟<sup>[4]</sup>。但上述工作远不能满足路面温度日变化过程分析的需要,为此,我们建立了太阳辐射日分布过程的如下模拟函数:

$$Q(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_0 t \quad (2.9)$$

$$a_0 = \frac{1}{24} \left[ (s_0 + s_{24}) + 2 \sum_{i=1}^{23} s_i \right] \quad (2.10)$$

$$a_k = \frac{2}{(k\pi)^2} \sum_{i=1}^{23} (s_{i+1} - s_i) [\cos k\omega_0(i+1) - \cos k\omega_0 i] \quad (2.11)$$

式中 $\omega_0 = \pi/24$ , $s_i$ 是时刻 $t=i$ ( $=0, 1, 2, \dots, 24$ )的太阳辐射实测值。

最后,我们还要讨论外界气温日变化过程的数学描述。一般外界气温的变化规律是复杂的,但晴天气温日变化过程却有一定的规律可循,在表达晴天气温日过程方面,Barber<sup>[5]</sup>采用正弦函数来描述,显然不够理想。文[4]做了更进一步的工作,提出采用二个正弦函数时组合来模拟

$$T_a = \bar{T}_a + \tilde{T}_a [0.96 \sin \omega(t-t_0) + 0.14 \sin 2\omega(t-t_0)] \quad (2.12)$$

式中 $\bar{T}_a$ 为日平均气温, $\tilde{T}_a$ 为日气温振幅, $t$ 为时间变量,并规定凌晨6点为0。

为着能对任意气候条件下气温日变化过程进行较准确的描述,可利用气象站的气温实测数据。设 $c_i$ 表示时刻 $t=i$ ( $=0, 1, 2, \dots, 24$ )气温实测数据,则可建立如下模拟函数:

$$T_a(i) = \frac{b_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos k\omega_0 t \quad (2.13)$$

式中系数 $\omega_0$ ,  $b_0$ ,  $b_k$ 的表达式与式(2.9)完全类似, 只需用 $c_i$ 替代 $s_i$ 即可得到.

综合上面的讨论, 可见边界条件(2.5)实际上是一非线性边界条件:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = B(T_0, \nu) \left[ f(x) \left( T_a(t) + \frac{a_s Q(t)}{B(T_0, \nu)} - \frac{F(T_0)}{B(T_0, \nu)} \right) - T_0 \right] \quad (2.14)$$

联结式(2.1)、(2.2)、(2.3)和(2.14), 便得到了二维 $n$ 层非线性不稳定路面温度场的数学模型.

### 三、周期性变化路面温度场的理论解

若路表边界值处于一个稳态波动的拟稳定状态, 则可以借助周期函数来表达一切大气因素对路面结构的影响. 此时, 路面结构内每天的温度波动是一种周期性过程(周期为24小时). 迄今为止, 路面温度场的理论研究几乎都依此为前提, 利用周期性变化的温度场解, 在计算有连续多天相同或类似天气时的路面温度具有良好的近似性. 本节我们要建立周期性变化的路面温度场的计算方法.

考察线性边界条件

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = B[f(x)e^{i\omega t} - T_0] \quad (3.1)$$

式中 $B$ 为常数, 频率 $\omega = \pi/24$ ,  $T_1$ ,  $T_0$ 为复平面上的复函数.

用线性边界条件(3.1)代替非线性边界条件(2.14), 并将温度函数 $T_j(x, y, t)$ 扩充为复平面上的复函数. 我们来研究由(2.1)、(2.2)、(2.3)和(3.1)组成的线性边值问题, 并记其为 $T_j(x, y, t, \omega)$ .

对周期性变化的温度场, 可预计路面以下不同深处的温度都作与路表边界温度同频率的周期变化, 所以有

$$T_j(x, y, t, \omega) = T_j(x, y) e^{i\omega t} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3.2)$$

利用条件(3.2), 通过一系列复杂的计算, 可得到边值问题(2.1)、(2.2)、(2.3)和(3.1)的理论解

$$T_j(x, y, t, \omega) = \frac{B}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{f}(q) (RL_j + iIL_j) e^{i\omega t} dq \quad (3.3)$$

式中 $RL_j$ ,  $IL_j$ 的具体表达式可参见论文[1]、[5].

若用 $IT_j(x, y, t, \omega)$ 及 $RT_j(x, y, t, \omega)$ 分别表示 $T_j(x, y, t, \omega)$ 的实部及虚部, 则 $IT_j(x, y, t, \omega)$ 及 $RT_j(x, y, t, \omega)$ 分别是与路表边界条件

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = B[f(x) \sin \omega t - T_0] \quad (3.4)$$

及

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = B[f(x) \cos \omega t - T_0] \quad (3.5)$$

对应的边值问题(2.1)、(2.2)、(2.3)和(3.4)及边值问题(2.1)、(2.2)、(2.3)和(3.5)的解.

暂时假定路表热交换系数 $B$ 是与路表温度无关的固定常数, 而路表有效辐射 $F$ 的计算公式(2.8)中的路表温度 $T_0$ 可用气温 $T_a$ 替代, 则由于气温 $T_a$ 可表示为正弦和余弦的线性组合, 所以 $F$ 亦可以表示为正弦和余弦的组合. 在此种情况下, 路表边界条件(2.14)仍是线性的,

故可利用叠加原理进行计算, 得到此种情况下路面温度场的解

$$T_j(x, y, t) = T_{A_j} + \frac{a_0 Q_j}{B} - \frac{F_j}{B} \quad (3.6)$$

式中  $T_{A_j}$ ,  $Q_j$ ,  $F_j$  分别表示与气温, 太阳辐射, 有效辐射有关的和式. 若太阳辐射日过程用 (2.9) 表达, 气温日过程用 (2.13) 式表达, 则有

$$Q_j = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k RT_j(x, y, t, h\omega) \quad (3.7)$$

$$T_{A_j} = \frac{b_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} b_k RT_j(x, y, t, k\omega) \quad (3.8)$$

完全类似地, 易得到  $F_j$  的具体表达式.

于是, 我们已在上述假定 ( $B$  是常数,  $F$  与路表温度无关) 下, 确定出对应线性边值问题的理论解, 将此解重新记为  $T_j^0(x, y, t)$ . 然后, 通过气温  $T_a$  及解  $T_1^0(x, 0, t)$  和风速  $v$  等分别按公式 (2.6) ~ (2.8) 确定出新的路表热交换系数  $B^1$  和有效辐射  $F^1$ , 再利用  $B^1$  和  $F^1$  按上述方法确定出新的路面温度场的解  $T_j^1(x, y, t)$ . 重复上述过程, 可得到序列  $\{B^k\}$ ,  $\{F^k\}$  和  $\{T_j^k\}$ . 易证  $\{B^k\}$  和  $\{F^k\}$  一致收敛, 且

$$M_1(B^k - B^{k-1}) \leq T_j^k - T_j^{k-1} \leq M_2(B^k - B^{k-1})$$

$$N_1(F^k - F^{k-1}) \leq T_j^k - T_j^{k-1} \leq N_2(F^k - F^{k-1})$$

式中  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  为有界常数.

从而序列  $\{T_j^k\}$  收敛, 记

$$\lim_{k \rightarrow \infty} T_j^k = T_j(x, y, t) \quad (3.9)$$

则  $T_j(x, y, t)$  即为所求非线性边值问题 (2.1)、(2.2)、(2.3) 和 (2.14) 的解.

在实际计算中, 一般经过 3 ~ 4 次迭代, 可使热交换系数  $B$  和有效辐射  $F$  分别达到精度 0.1 (W/m<sup>2</sup>K) 和 1.0 (W/m<sup>2</sup>) 以上. 而由此引起的路面温度的误差不超过 0.1 (K).

#### 四、地温估计及地温修正值

路面温度场不仅受到来自表面的外界温度的影响, 而且还受到土基深处的地温的影响. 地温对路表附近路面温度的影响并不大, 但对基层以下温度场的影响却占主导地位. 全面分析路面温度场时必须考虑以年为周期变化的外界温度对路面温度场的影响, 并根据迭加原理对上述理论解进行修正. 由于以年为周期变化的外界温度主要影响路面较深处的温度, 因此, 可采用均质半无限体为模型进行分析.

设  $T_{a_n}$  及  $\tilde{T}_{a_n}$  分别表示平均气温及气温振幅, 则气温年变化的近似曲线为

$$T_{a_n} = \bar{T}_{a_n} + \tilde{T}_{a_n} \sin(\omega_n(t_n + \varphi_n)) \quad (4.1)$$

作用于地表的热力除年变化的外界气温外, 还有太阳辐射等, 根据有关文献 [7]、[8]、[9], 一年中地面因吸收太阳辐射热而产生的实际增温为

$$T_0 = \frac{\bar{Q}_0 a_s}{\pi B} D_r D_L \quad (4.2)$$

式中  $\bar{Q}_0$  是中午最大太阳辐射的年均值,  $a_s$  是路表对太阳辐射吸收率的年均值,  $B$  是热交换系

数的年均值,  $D_F$  是一年中地面因有效辐射而损失的热量系数,  $D_L$  是地面蒸发耗热系数。

由此可建立起地温估计的数学模型:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4.3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = B [T_{an} + T_Q - T|_{y=0}] \quad (4.4)$$

式中  $\lambda$ ,  $\alpha$  为土基的导热系数和导温系数。

对以年为周期变化的边界条件, 表面温阻极小, 可忽略不计。求上述数学模型的理论解, 得到地温的年变化曲线

$$T_n = T_Q + T_{an} + \bar{T}_{an} \exp(-ys) \sin(\omega_n(t + 252) - ys) \quad (4.5)$$

式中  $t_n$  表示一年中的第  $n$  天,  $\omega_n = 2\pi/365$ ,  $s = \sqrt{\omega_n/2\alpha}$ 。

理论计算和实际观测均表明: 随着深度的增加, 日变化的外界气温无规律的波动对地温的影响越来越小, 一般在 80cm 左右, 这种影响可忽略不计。因此, 某一相当的深度  $y_h$ , 我们可认为按公式 (4.5) 计算出的温度与实际温度基本相符, 将这一深度  $y_h$  处的温度曲线记为  $T_n$ 。此外, 如果路表面日变化的温度谐波传至这一深处时振幅已衰减为很小以致可以忽略不计, 则该深处在一天中的温度值可近似看作常数  $T_c$ 。这样, 在深度  $y_h$  处地温对温度场理论解的修正值即为:

$$T_d|_{y=y_h} = T_c - T_n = T_{y_h} \quad (4.6)$$

式中  $T_d$  表示任意深度理论解的修正值,  $T_{y_h}$  为深度  $y_h$  处的修正值。

深度  $y$  越浅, 修正越小, 当  $y=0$  时,  $T_d=0$ , 即: 路表面温度完全取决于当天的气候条件。由于  $T_c$  和  $T_n$  均是常数, 因此可把修正值的分布近似作为稳定热传导问题来处理。对于  $n$  层路面结构温度场理论解的修正值分布函数  $T_{d,k}$ , 我们求得如下表达式:

$$\left. \begin{aligned} T_{d,1} &= T_{h,1} y / g_1 \\ T_{d,k} &= T_{h,k-1} + (T_{h,k} - T_{h,k-1})(y - h_{k-1}) / g_k \\ T_{h,k} &= T_{y_h} D_{h,k} / \left( \sum_{j=1}^n D_{h,j} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

式中  $D_{h,k}$  为第  $k$  层的热阻, 定义为该层的厚度与该层材料的导热系数之比, 即:

$$\begin{cases} D_{h,k} = g_k / \lambda_k & (k=1, 2, \dots, n-1) \\ D_{h,n} = (y_h - h_{n-2}) / \lambda_n \end{cases}$$

## 五、任意气候条件下路面温度场的计算方法

如果路面结构内每日的温度波动处于稳态波动的拟稳定状态, 则可利用周期性变化的温度场解来确定其温度分布。但在冬季前后, 路面温度经常并不处于拟稳定状态。此外, 试验和调查表明: 沥青路面结构的断裂破坏主要发生于初冬及冬季低温时期。因此, 有必要对任意气候条件下路面温度场的计算方法进行研究。本文作者深入研究了上述问题, 提出了任意气候条件下路面温度场的计算方法, 该方法由以下三个步骤组成:

### 1. 路表温度的计算

由于路表温度完全由当时的气候条件和路面材料特性所决定,所以利用本文第三节提出的周期性变化的温度场的理论解,可准确估计各类气候条件下的路表温度 $\psi(x,t)$ ;

### 2. 路面结构内温度分布的计算

由于路表温度已知,因此,在确定路面结构内的温度分布时,路表边界可采用传热学中的第一类边界条件,结构内层间接触仍采用第四类边界条件.由此得到计算所需的基本方程:

(i) 热传导方程(2.1);

(ii) 路表边界条件:

$$T_1(x, 0, t) = \psi(x, t);$$

(iii) 初始条件:

$$T_j(x, y, 0) = \varphi(x, y);$$

(iv) 层间接触条件(2.2).

在上述问题中,由于采用了第一类边界条件,避免了由大气温度计算路表温度的复杂过程,因此,采用通常的有限元法或差分法即可方便地求解上述计算模型.此外,由于路面结构中的热传导主要发生于沿厚度方向,因此,在较为粗略的温度估计下,我们亦可采用一维热传导模型进行计算,从而使计算更为简化;

### 3. 地温估计及对理论解的修正值

在上述两步中确定了受外界因素影响的路面温度分布的理论值,但实际上路面温度分布还受到土基深处的地温的影响.可利用本文第五节中(4.5)和(4.7)分别进行地温计算和对理论解的修正值的计算,并利用迭加原理对路面温度分布的理论值进行修正.

根据上面提出的计算方法,我们研制和设计了半刚性基层沥青路面二维非线性不稳定温度场的计算软件,并结合“八五”国家重点科技攻关项目85—403—02—02和“八五”交通部科研项目“公路柔性路面设计规范修订”的有关研究工作,对吉林长农试验路和河北涿州试验路的温度实测资料作了大量计算与实测的比较研究,结果表明:在正确掌握气象条件和路面材料特性参数的条件下,采用该软件进行计算,能相当可靠和准确预测不同时间和位置的路面

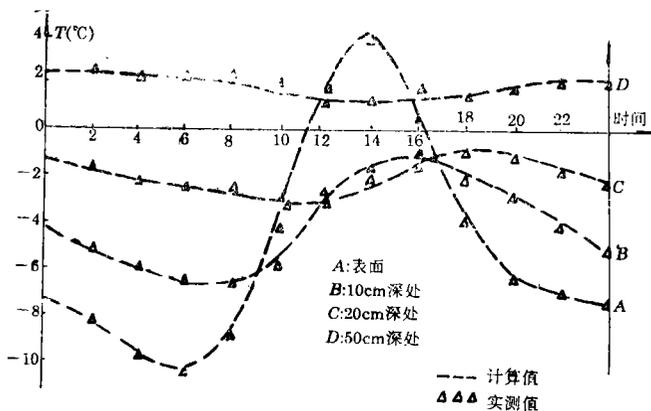


图1 路面温度场实测与计算比较

温度。作为算例，图1给出了河北涿州试验路ALF试验场1994年12月15日的温度实测资料与理论计算对比的情况：

试验路面结构为9cm沥青混凝土面层+30cm水泥碎石+非冻胀性土基，计算日最高气温为2.1℃，最低气温为-9.5℃，太阳辐射日总量为9.20(MJ/m<sup>2</sup>)，平均风速约为1.0(m/s)，日照约7小时，计算结果见图1。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 吴赣昌，沥青路面二维层状体系温度场分析，中国公路学报，(4) (1992)。
- [ 2 ] R. Schulze, *Strahlenklima der Erde*, Damstadt (1970)。
- [ 3 ] F. 凯尔别克著，《太阳辐射对桥梁结构的影响》，刘兴法等译，中国铁道出版社 (1981)。
- [ 4 ] 严作人，层状路面温度场分析，研究生论文，同济大学科技情报站 (1982)。
- [ 5 ] F. S. Barber, Calculation of maximum pavement temperature from weather reports, *H. R. B. Bull*, 168 (1957)。
- [ 6 ] 吴赣昌、张淦生，非线性路面温度场的计算理论，佛山大学学报，(6) (1993)。
- [ 7 ] J. A. Duffie and W. A. Beckman, 《太阳能—热能转换过程》，葛新石译，科学出版社 (1980)。
- [ 8 ] R. G. 巴里, R. J. 乔利著，《大气、天气和气候》，施尚文等译，高等教育出版社 (1984)。
- [ 9 ] 幺枕生，《气候学原理》，科学出版社 (1959)。
- [ 10 ] 吴赣昌，沥青路面温度应力分析，中国公路学报，(4) (1993)。
- [ 11 ] 同济大学道路与交通工程研究所等，《半刚性基层沥青路面》，人民交通出版社 (1991)。

## The Analytic Theory of the Temperature Fields of Bituminous Pavement over Semi-Rigid Roadbase

Wu Ganchang

(Department of Mathematics, Foshan University, Foshan,  
Guangdong, 528000, P. R. China)

### Abstract

Based on the fundamental principles of meteorology and thermodynamics, the calculation theory of the nonlinear unstable pavement temperature fields of two-dimension layered system by analytic theory is established and the calculation methods of surface temperature, ground temperature and temperature distribution along the thickness under different climate conditions are put forward respectively.

**Key words** bituminous pavement, temperature field, solar radiation, thermal conduction