

热网络法预测车内温度的理论和实验研究

翁建华¹, 舒宏坤¹, 石梦琦¹, 崔晓钰²

(1. 上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 为对车内温度水平进行预测, 采用热网络法对车辆停车和行驶状态下的车内温度进行计算。太阳辐射是影响车内温度水平的主要因素, 而热网络法通过建立和求解节点热平衡方程, 获得各节点的温度, 尤其适用于以辐射为主的换热问题。车内外的对流换热采用实验关联式进行计算。由热网络法建立的节点热平衡方程组为非线性方程组, 采用牛顿迭代法进行了求解。计算结果与实测温度值的比较显示, 两者吻合较好, 表明热网络法用于车内温度预测的有效性。另外, 计算结果也显示车窗玻璃的透射率对车内温度有明显影响, 在考虑安全的前提下, 选取合适透射率的车窗玻璃材料可起到减少车辆能耗的作用。

关键词: 热网络法; 热分析; 车内温度; 预测方法; 热辐射; 非线性方程组

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Theoretical and Experimental Study on the Thermal Network Method for Temperature Prediction in a Car

WENG Jianhua¹, SHU Hongkun¹, SHI Mengqi¹, CUI Xiaoyu²

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to predict temperature in a car, the thermal network method (TNM) was used to calculate the temperature when the car was parked or driven. Considering the solar radiation is the main factor which affects the temperature level in the car, TNM was used to calculate the temperature at each node after energy equations for all nodes have been established and solved, which is especially suitable for heat transfer problems dominated by thermal radiation. Empirical correlations were adopted to calculate the convection heat transfer between car surfaces and air. The established equations are non-linear, so the Newton iteration method was used to solve the equations. The calculation results are in consistent with the measured temperature, which indicates the effectiveness of TNM for the temperature prediction. Furthermore, the transmissivity of glass has obvious effect on the temperature level of the car. Without violating safety requirements, using glass with proper transmissivity can save energy for the car.

Keywords: thermal network method; thermal analysis; temperature in a car; prediction method; thermal radiation; non-linear equation

保持车内舒适性的前提下如何降低能耗,减少部件数量,从而降低制造成本是车辆生产厂家关注的一个重要问题。无论是停车状态还是行驶状态,太阳辐射都是影响车内温度水平的一个重要因素。不同于CFD数值计算^[1-3],热网络法将研究对象划分成若干个单元体,每个单元体为一个节点,并假设每个单元体内的温度均匀,建立并求解节点热平衡方程组,从而得到各节点的温度值^[4]。与以控制容积法或有限差分法为基础的数值计算方法相比,热网络法具有使用简便、灵活的特点,且可选取较少节点数,尤其适用于以辐射为主的传热问题,是工程实践进行热分析计算的一种有效方法。目前采用热网络法对车内温度进行预测的相关文献较少,且大多是计算停车状态下的车内温度^[5-6]。本文采用热网络法对车辆在停车状态和行驶状态下车内温度进行计算,并将计算结果与实测值进行了比较。

1 车内温度预测的热网络法

车内温度主要受太阳辐射等因素的影响,正确预测车内温度,对改进车内空调系统设计、减少温度传感器数量、降低车辆制造成本、改善车内环境舒适度等具有重要作用。采用热网络法对车内温度进行预测的方法,还便于将计算程序嵌入到车内空调系统软件中。首先将车体划分成若干单元体,每个单元体对应一个节点,根据能量守恒,每个节点即可建立一个节点网络方程。对不透明外部节点,节点热网络方程为

$$m_k C_{pk} \frac{dT_k}{dt} = q_k - \varepsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - r_{ek}) G_{ek} + (1 - r_{sk}) q_{sk} \quad (1)$$

式中: m_k 为节点表面单位面积的质量, kg/m^2 ; C_{pk} 为节点材料的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_k 为节点温度, K ; q_k 为节点通过对流或导热的热流密度, W/m^2 ; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_k 为节点表面发射率; r_{ek} 为节点表面对长波辐射的反射率; r_{sk} 为节点表面对太阳辐射的反射率; G_{ek} 为周围环境对节点单位面积的长波辐射, W/m^2 ; q_{sk} 为太阳辐射密度, W/m^2 。

对图1所示的玻璃节点,节点热网络方程为

$$m_k C_{pk} \frac{dT_k}{dt} = q_k - \varepsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - r_{ek}) G_{ek} + (1 - r_{sk}) q_{sk} + G_k - J_k \quad (2)$$

$$J_k = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + r_{ek} G_k + \tau_{sk} q_{sk} \quad (3)$$

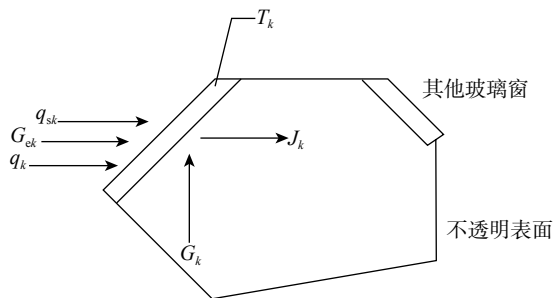


图1 玻璃节点换热简图

Fig.1 Schematic of the heat transfer for a glass node

式中: T_k 为玻璃节点温度, K ; r_{ek} 为玻璃外表面对长波辐射的反射率; r_{sk} 为玻璃外表面对太阳辐射的反射率; τ_{sk} 为玻璃对太阳辐射的透射率; G_k 为车内表面对节点 k 内表面单位面积的热辐射, W/m^2 , $G_k = \sum_{j=1}^N J_j F_{kj}$; J_k 为节点 k 的有效辐射, W/m^2 ; F_{kj} 为辐射角系数。

车内表面的自然对流换热由自然对流换热准则关系式,即努塞尔数 Nu 与格拉晓夫数 Gr 之间的关联式进行计算^[7-8]。车外表面的强制对流换热则采用简化计算,由空气与车辆的相对速度计算得到车顶、前后挡风玻璃、两侧车窗等的对流换热系数^[9-10]。同样,可建立其他节点的热网络方程,包括车内空气节点。在测量或计算得到太阳辐射密度 q_{sk} 后,联立求解这些方程,即可获得不同时刻车内温度的预测值。

对于以辐射换热为主的传热问题,由热网络法得到的节点热网络方程组是非线性的,非线性方程组的求解可采用牛顿迭代法。对于非线性方程组:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0 \quad (4)$$

式中, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 牛顿法的迭代格式为^[11]

$$\mathbf{x}^{m+1} = \mathbf{x}^m - [\mathbf{F}'(\mathbf{x}^m)]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{x}^m), \quad m = 0, 1, \dots \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}^m$, $\mathbf{x}^{m+1}$ 分别为 $\mathbf{x}$ 的第 m , $m+1$ 次迭代值; $\mathbf{F}'(\mathbf{x})$ 为 $\mathbf{F}$ 的 Jacobi 矩阵。

2 预测结果与实测值的比较

按上述计算方法,对某车型不同时间停车及行驶状态下车内温度进行了计算,并将预测结果与实测值进行了比较。计算中太阳辐射密度由车辆所在位置及天气状况计算得到^[12]。车内表面间的辐射角系数通过相关公式或数值积分计算得到^[13]。假设车内空气温度均匀,车窗玻璃沿厚度方向温度均匀,车体其余部分内外表面间则存在温差,

并忽略车头和后备箱与车辆主体部分间的热量传递。计算取车体表面节点 14 个(如图 2 所示),分别为车底板内表面节点 1、左右侧门板内表面节点 2 和 3、车顶板内表面节点 4、车前部及后备箱隔板(又称前后围板)节点 5 和 6、左右侧门玻璃窗节点 7 和 8、前后挡风玻璃窗节点 9 和 10、车底板外表面节点 11、左右侧门板外表面节点 12 和 13、车顶板外表面节点 14,车内空气为节点 15。

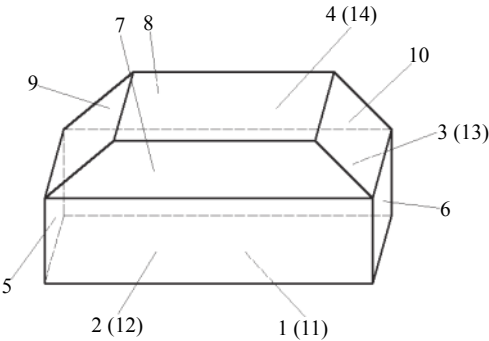


图 2 车体表面节点分布
Fig.2 Node locations on car surfaces

车内温度由 4 个测点通过热电偶测量得到,4 个测点分别位于车内 4 个座椅上方。外部风速由风速仪在一段时间内按 10 s 时间间隔测量并记录后取平均值。计算中车玻璃的透射率为 0.55。表 1 为 9 月份某一天几个时刻车内测点的温度值。当天的天气状况为晴,有少量云。由表可见,同一时刻车内 4 个测点温度的最大差值均在 2℃ 以内。图 3 为当天该车型在上海地区停车状况下车内温度预测值与测量值之间的比较,其中测量值为 4 个测点温度的平均值。测量当天外部平均风速 0.9 m/s。由图 3 可见,在 12:30~14:00 这一时间段内,车内温度先升后降,这主要由太阳辐射在这段时间内的变化所造成。在 9 月份,车内最高温度可超过 50℃,时间在 13:15 前后。表 2 为预测值与测量值的差值,由表可见,差值的绝对

表 1 车内 4 个测点的温度测量值

Tab.1 Four measured temperature values at different time in the car

时间	测点 1/℃	测点 2/℃	测点 3/℃	测点 4/℃	最大差值/℃
12:35	47.8	46.3	47.4	46.8	1.5
12:55	51.4	49.7	50.9	50.4	1.7
13:15	53.7	52.0	52.9	52.2	1.7
13:35	52.9	51.1	51.6	51.1	1.8
13:55	51.4	50.5	51.0	50.8	0.9

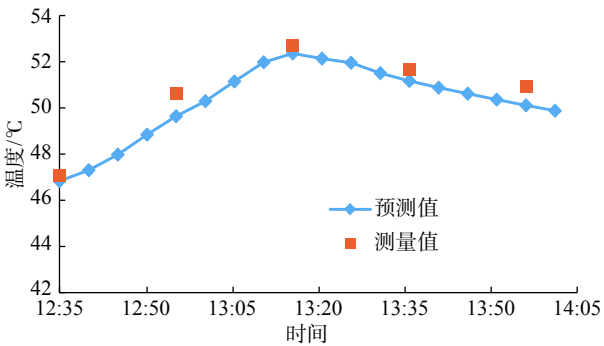


图 3 9 月份停车状态下车内温度预测值与测量值的比较
Fig.3 Comparison between predicted and measured temperatures in a parking car in September

表 2 9 月份车内温度预测值与测量值的差值

Tab.2 Difference between predicted and measured temperatures in the car in September

时间	测量值/℃	预测值/℃	差值/℃
12:35	47.08	46.83	-0.25
12:55	50.60	49.64	-0.96
13:15	52.70	52.36	-0.34
13:35	51.68	51.17	-0.51
13:55	50.93	50.11	-0.82

值均小于 1℃。

图 4 和图 5 分别为 12 月份和 1 月份某一天该车型车内温度预测值与测量值之间的比较。两次实测天气状况分别为晴且少云和多云有雾霾,外部平均风速分别为 1.1 m/s 和 1.4 m/s。表 3 和表 4 分别为 12 月份和 1 月份预测值与测量值的差值,由表可见,两者差值的绝对值均小于 1.5℃。表 5 为实测时车内温度与当时环境温度之间的差值。其中,12 月份实测时两者的温差最大,在 20~24℃ 之间;而 1 月份实测时两者的温差最小,在 11~13℃ 之间。这主要与实测时的天气状况有关,12 月份实测时天气晴朗少云,而 1 月份实测时天气多云

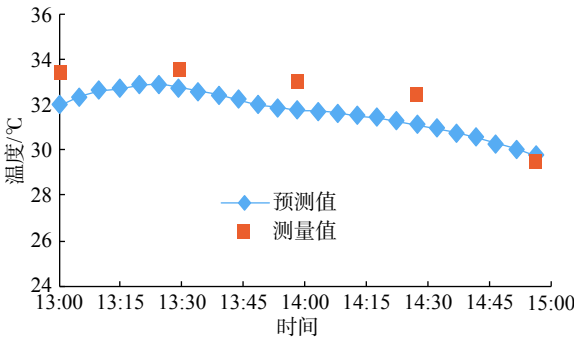


图 4 12 月份停车状态下车内温度预测值与测量值的比较
Fig.4 Comparison between predicted and measured temperatures in a parking car in December

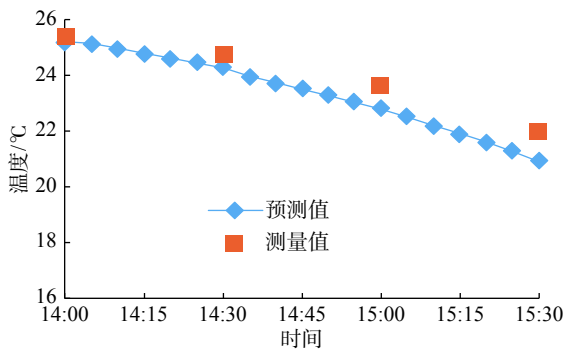


图 5 1 月份停车状态下车内温度预测值与测量值的比较

Fig. 5 Comparison between predicted and measured temperatures in a parking car in January

表 3 12 月份车内温度预测值与测量值的差值

Tab.3 Difference between predicted and measured temperatures in the car in December

时间	测量值/℃	预测值/℃	差值/℃
13:00	33.38	32.21	-1.17
13:30	33.53	33.24	-0.29
14:00	32.98	32.03	-0.95
14:30	32.45	31.21	-1.24
15:00	29.48	30.00	0.52

表 4 1 月份车内温度预测值与测量值的差值

Tab.4 Difference between predicted and measured temperatures in the car in January

时间	测量值/℃	预测值/℃	差值/℃
14:00	25.38	25.18	-0.20
14:30	24.73	24.27	-0.46
15:00	23.63	22.78	-0.85
15:30	21.92	20.73	-1.19

且有雾霾。

图 6、图 7 为 1 月份某一天车辆在行驶时车内温度预测值与测量值之间的比较, 其中: 图 6 车辆行驶方向南偏东 15°, 测量与计算的时间段为上午 9:00~9:30; 图 7 行驶方向北偏西 15°, 测量与计算的时间段为上午 10:00~10:30。车辆行驶平均时速 85 km/h, 计算中车内空调系统关闭。实测时车内人员共 2 人, 计算时每人按 116 W 散热量进行计算^[10]。与车辆处于停车状态不同的是, 由于行驶中车辆与空气的相对速度较高, 车身与外部空气间的对流换热量增加, 而自然风的影响则很小。由于车辆向西北行驶时, 10:00~10:30 时间段太阳辐射密度高于向东南行驶时 9:00~9:30 时

表 5 车内温度与环境温度的差值

Tab.5 Difference between the temperatures in the car and in the ambient

月份	时间	环境温度/℃	车内温度/℃	差值/℃
1	14:00	13.1	25.38	12.28
1	14:30	11.8	24.73	12.93
1	15:00	11.3	23.63	12.33
1	15:30	10.9	21.98	11.08
9	12:35	31.8	47.08	15.28
9	12:55	31.5	50.60	19.10
9	13:15	31.5	52.70	21.20
9	13:35	31.6	51.68	20.08
9	13:55	31.2	50.93	19.73
12	13:00	10.5	33.38	22.88
12	13:30	12.8	33.53	20.73
12	14:00	10.2	32.98	22.78
12	14:30	8.5	32.45	23.95
12	15:00	8.1	29.48	21.38

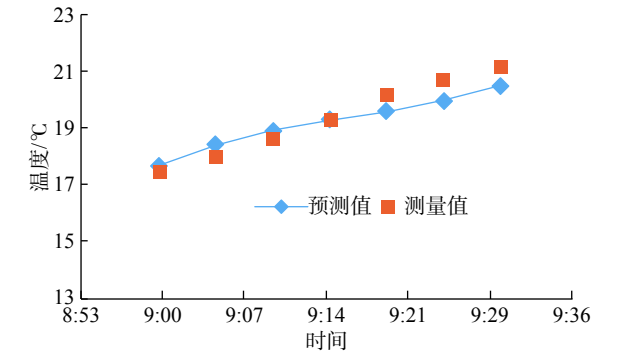


图 6 1 月份车辆东南方向行驶时车内温度预测值与测量值的比较

Fig. 6 Comparison between predicted and measured temperature in a southeast moving car in January

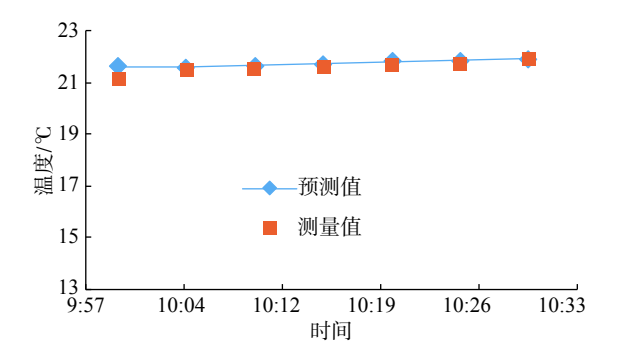


图 7 1 月份车辆西北方向行驶时车内温度预测值与测量值的比较

Fig. 7 Comparison between predicted and measured temperatures in a northwest moving car in January

间段太阳辐射密度，因此，车辆向西北行驶时车内温度普遍要高于向东南方向行驶时的车内温度。表6为行驶时车辆温度预测值与测量值的差值，由表可见，两者差值的绝对值均小于1℃。

表 6 1 月份车辆行驶时车内温度预测值与测量值的差值
Tab.6 Difference between predicted and measured temperatures in a moving car in January

时间	测量值/℃	预测值/℃	差值/℃
9:00	17.45	17.68	0.23
9:05	18.00	18.40	0.40
9:10	18.60	18.90	0.30
9:15	19.25	19.28	0.03
9:20	20.15	19.59	-0.56
9:25	20.65	19.96	-0.69
9:30	21.15	20.49	-0.66
10:00	21.15	21.62	0.47
10:05	21.45	21.58	0.13
10:10	21.55	21.64	0.09
10:15	21.60	21.72	0.12
10:20	21.65	21.80	0.15
10:25	21.70	21.85	0.15
10:30	21.95	21.90	-0.05

图8为不同透射率车窗玻璃1月份在停车状态下车内温度计算值的比较，其中玻璃透射率从高到低分别为0.82, 0.55, 0.22。由图8可见，相同情况下车窗玻璃为低透射率时车内温度要比中等透射率低2℃左右，而高透射率则要高2.5℃左右。可见，采用低透射率车窗玻璃或采用贴膜降低车窗玻璃的透射率可有效降低车内温度。

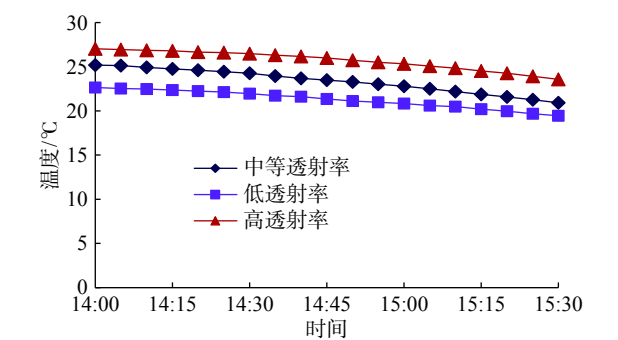


图 8 不同玻璃透射率车内温度的比较
Fig.8 Temperature comparison in a car with different glass transmittivities

3 结 论

采用热网络法对车辆在不同时刻停车与行驶状态下车内温度分别进行了计算，并与实测值进行了比较，结果显示两者吻合较好。车内温度主

要受太阳辐射等因素的影响，热网络法通过建立各节点热平衡方程，并求解非线性方程组，从而获得各节点的温度值，是进行车内温度预测的有效方法。在采用热网络法预测车内温度时，除了考虑影响车内温度的太阳辐射，在节点热平衡方程中还考虑了车辆内外表面的对流换热，扩展了热网络法的应用范围。同时，实测数据及预测结果都显示了天气状况对车内温度的影响。另外，预测结果也显示了车窗玻璃的透射率对车内温度有明显影响，降低车窗玻璃的透射率可有效降低车内温度。在工程实践中，采用热网络法预测车内温度还需进一步研究和完善。这包括：增加节点数量以便进一步提高预测的精度；热网络模型中一些参数的取值与修正；空调系统运行时车内温度的预测等。

参考文献：

[1] 李毓洲, 谭夏梅, 梁明影. 基于 Ansys 的汽车空气动力学特性分析[J]. 机械设计与制造, 2010(2): 113-115.
[2] CHIEN C H, JANG J Y, CHEN Y H, et al. 3-D numerical and experimental analysis for airflow within a passenger compartment[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(4): 437-445.
[3] 熊可嘉, 王伟, 张万平. 考虑太阳辐射的轿车客舱流场与温度场的数值计算[J]. 制冷与空调, 2008, 22(6): 12-15.
[4] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1998.
[5] MEZRHAB A, BOUZIDI M. Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(14/15): 1697-1704.
[6] 张文灿, 陈吉清, 兰凤崇. 太阳辐射下车窗玻璃特性对车内温度场的影响研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 119-125.
[7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1998.
[8] INCROPERA F P, DEWITT D P. Introduction to heat transfer[M]. New York: Wiley, 1985.
[9] 方贵银, 李辉. 汽车空调技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
[10] 吴庆, 戴细安. 微型汽车空调制冷量的简化计算[J]. 装备制造技术, 2006(4): 72-75.
[11] 李庆扬, 莫致中, 祁力群. 非线性方程组的数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
[12] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 1990.
[13] 杨贤荣. 辐射换热角系数手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.