

基于BP神经网络的地铁车站早龄期 混凝土热学参数反演分析

曹玉新¹, 寇 帅², 霍曼琳², 姜永涛¹, 王国义³, 李宗奇³, 李金武¹

(1. 中电建铁路建设投资集团有限公司, 北京 100060; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 中电建成都建设投资有限公司, 四川 成都 610218)

摘 要: 针对地铁车站混凝土结构的复杂性和地下环境的特殊性, 传统的室内试验方法难以准确测得实际工程中的混凝土温度参数。为提高早龄期混凝土温度场模拟的精度, 通过利用BP神经网络对混凝土热学参数反演获得精确的数值。首先确定混凝土热学参数(导热系数、比热、胶凝材料放热量)的选取范围, 采用正交设计生成25组样本进行温度场模拟, 得到不同工况下的温度变化数据, 利用温度数据训练BP神经网络, 建立混凝土热学参数与温度变化之间的非线性映射关系并反演热学参数, 最后利用多项现场实测温度对反演参数进行验证。结果表明: 模拟数值与实测温度的误差较小。该方法不仅提高了模拟的精度, 且相比于传统试验更加经济高效。

关键词: 地铁车站; 大体积混凝土; 温度场; BP神经网络; 数值模拟

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0145-08

Inverse Analysis of Thermal Parameters of Early-age Concrete in Subway Stations Based on BP Neural Network

CAO Yuxin¹, KOU Shuai², HUO Manlin², JIANG Yongtao¹, WANG Guoyi³, LI Zongqi³, LI Jinwu¹

(1. Sinohydro Railway Construction Co., Ltd., Beijing 100060, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Chengdu Construction Investment Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610218, China)

Abstract: In view of the complexity of the concrete structure of the subway station and the particularity of the underground environment, the traditional indoor test method is difficult to accurately measure the concrete temperature parameters in the actual project. In order to improve the accuracy of temperature field simulation of early age concrete, the accurate value of concrete thermal parameters is obtained by using BP neural network. Firstly, the selection range of thermal parameters (thermal conductivity, specific heat, heat release of cementitious material) of concrete is determined. Secondly, 25 groups of samples are generated by orthogonal design to simulate the temperature field, and the temperature change data under different working conditions are obtained. Thirdly, the BP neural network is trained by using the temperature data, and the nonlinear mapping relationship between the thermal parameters of concrete and the temperature change is established and the thermal parameters are inverted. Finally, the inversion parameters are verified by a number of field measured temperatures. The results show that the error between the simulated value and the measured temperature is small. This method not only improves the accuracy of the simulation, but also is more economical and efficient than the traditional test.

Keywords: subway station; mass concrete; temperature field; BP neural network; numerical simulation

收稿日期: 2024-05-20

修稿日期: 2024-06-20

基金项目: 2021年度中国电建智慧轨道交通工程研究中心定向支持计划(DJ-PTZX-2021-02)

作者简介: 曹玉新(1966—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事轨道工程技术与管理工作。E-mail: kekexili2002@126.com

通讯作者: 霍曼琳(1964—), 女, 博士, 教授, 硕导, 主要从事土木工程材料等方面工作。E-mail: huomlin@126.com

地铁系统是现代城市交通的重要组成部分,近年来,为提高城市的基础设施建设水平和公共服务能力,地铁车站建设迅速发展^[1]。由于地铁车站混凝土顶板、底板和侧墙等构件体积大、比表面积较小,受水泥水化反应影响,混凝土在浇筑完成后温度持续升高,而混凝土内部热量散发慢于表面,里表温差产生的温度应力易引起混凝土开裂^[2]。地铁车站混凝土结构复杂,且在地下环境中,普通试验准确性较低,现研究人员多采用有限元软件模拟分析,其中,ABAQUS 在早龄期混凝土温度场领域应用较为成熟^[3],在温度场的模拟中,混凝土的热学参数(如导热系数、比热容、胶凝材料放热量)的取值决定着模拟结果的准确性。通常由室内试验测得混凝土热学参数,但工程实际受气象、施工等因素与试验数据有偏差,严重影响混凝土温度场的模拟结果^[4]。

国内外有诸多学者针对混凝土温度场展开了大量的研究。自 20 世纪 60 年代, Wilson^[5] 研发了二维温度场有限元仿真分析程序 DOT-DICE,这也是首次将有限元方法应用于大体积混凝土温度分析中。之后,朱伯芳^[6] 结合了混凝土龄期的影响、混凝土温度的影响和水泥水化反应完成程度的影响,提出了一种新的混凝土绝热温升计算模型。马成成等^[7] 优化了有限元计算程序 RCTS,使其能够计算多种保温材料所组成的温度场分析。朱鹏飞等^[8] 测定了不同掺量矿物掺合料的低热硅酸盐水泥水化放热过程,并用 Krstulovic-Dabic 模型 3 个时期的积分方程对比分析水化放热的差异。Saeed^[9] 开展了纤维对大体积混凝土早期温度裂缝的影响,并使用 DIANA FEA BV 有限元软件对两个现场大体积混凝土进行了多物理场的数值模拟,分析了大体积混凝土温度应力和开裂问题。王新刚等^[10] 实测航电枢纽大体积混凝土现场温度数据,通过对大体积混凝土温度场进行参数分类分析,温度场模拟结果与现场实测吻合程度高。江东等^[11] 研究不同养护工艺下对混凝土早期温度场的影响,包括模板的种类、拆模时机和养护温度等。王凯等^[12] 利用 BP 神经网络准确预测不同地区的混凝土箱梁截面最大温度梯度。

针对地铁车站的特殊环境,为实现混凝土温度场精确模拟,首先查阅资料选取待反演热学参数取值范围,利用正交设计列出 25 组样本,使用 ABAQUS 模拟得出样本的温度变化数据,将数据代入 MATLAB 中训练 BP 神经网络并反演获得实际工程中的混凝土热学参数,最后利用反演的参数进行

温度场数值模拟,与多组实测温度进行对比验证反演参数的准确性。

1 工程概况

双流机场 2 航站楼东站车站项目位于双流国际机场 2 航站楼前地面停车场地下,为地下三层两跨 12 m 岛式站台车站,车站总长为 696.2 m,基坑埋深为 26.59 m,采用明挖施工。

本研究选取车站第 9 施工段(N9 段)负一层混凝土顶板(见图 1)作为研究对象,顶板厚为 0.9 m~1.2 m,两跨共 21.9 m,两侧过梁尺寸为 0.8 m×2.0 m;中间纵梁尺寸为 1.2 m×2.1 m,该施工段长度为 24.8 m。支护模板为 2 cm 胶合板,14 d 后拆除;上表面覆盖塑料薄膜和 3 mm 土工布,养护 7 d 后移除。



图 1 地铁车站结构示意图

顶板与梁一起浇筑,混凝土强度等级为 C35,密度为 2 450 kg/m³;其中水泥采用 P·O 42.5 级,由四川德胜集团水泥有限公司生产;粉煤灰由广安鑫远环保节能建材有限公司供应,掺量为 20%;骨料产自乐山,砂为中砂,石子粒径在 5.0 mm~31.5 mm。

2 温度场的计算原理与计算资料

2.1 温度场的边界条件

混凝土温度场的边界条件是反映其表面与周围介质之间的热交换关系。根据混凝土表面温度随时间变化的函数关系,边界条件可分为四类^[13]:

(1) 混凝土表面温度 T 是时间的已知函数:

$$T(\tau) = f(\tau) \quad (1)$$

(2) 混凝土表面热流量是时间的已知函数:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = f(\tau) \quad (2)$$

式中: T 为混凝土表面温度,℃; τ 为混凝土龄期,d; λ

为导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; n 为混凝土结构表面外法线方向。

(3) 混凝土与空气接触面为对流换热边界:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a) \tag{3}$$

式中: β 为混凝土表面放热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; T_a 为外界温度, $^\circ\text{C}$ 。

(4) 当混凝土板和固体接触时,若接触面温度与热流量均连续,此时 $(T_1 = T_2)$ 边界条件为:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \tag{4}$$

式中: T_1 、 T_2 分别为混凝土板和固体接触面温度, $^\circ\text{C}$; λ_1 、 λ_2 分别为混凝土板和固体导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

2.2 混凝土热学参数计算

2.2.1 水泥放热量

水泥总水化热量 Q_0 依据《大体积混凝土温度应力与温度控制》确定,选取 $Q_0 = 330 \text{ kJ/kg}^{[14]}$ 。

2.2.2 胶凝材料放热量

胶凝材料水化放热总量 Q 依据式(5) 计算^[15]:

$$Q = kQ_0 \tag{5}$$

式中: k 为调整系数,其取值见表 1。

表 1 不同掺量粉煤灰水化热调整系数

粉煤灰掺量	0%	10%	20%	30%	40%	50%
k	1.00	0.96	0.95	0.93	0.82	0.75

因粉煤灰掺量为 20%,由式(5) 和表 1 计算得出 Q 为 313.5 kJ/kg 。

2.2.3 导热系数和比热

在混凝土温度场计算中,导热系数 λ 与比热 c 是基本的物理参数,它们直接影响混凝土的热传递特性。

混凝土的 λ 与 c 依据式(6)、式(7) 的重量百分比加权方法,结合文献及规范所提供的数据(见表 2) 得到^[14-16]。其中粉煤灰的 λ 与 c 按水泥参数选取:

$$c = \frac{\sum W_i c_i}{\sum W_i} \tag{6}$$

$$\lambda = K_s \frac{\sum W_i \lambda_i}{\sum W_i} \tag{7}$$

式中: W_i 为混凝土结构各成分的重量, kg ; c_i 为混凝土各成分的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; λ_i 为混凝土各成分的导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; K_s 为修正系数,取 1.05。

表 2 混凝土各材料配合比和热性能系数

项目	水	水泥	粉煤灰	砂	石子	聚羧酸高性能减水剂	高效防水剂
重量 / kg	170	330	83	787	1023	7.43	29.00
百分比 / %	7.00	13.58	3.42	32.39	42.11	0.31	1.19
导热系数 $\lambda / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	2.16	4.59	4.59	11.10	14.19	—	—
比热 $c / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	4.19	0.54	0.54	0.75	0.76	—	—

由式(6)、式(7) 及表 2 可知,混凝土导热系数与比热为:

导热系数 $\lambda = 11.029 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

比热 $c = 0.945 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

2.3 温度资料

混凝土顶板浇筑日期为 5 月,气温见图 2。

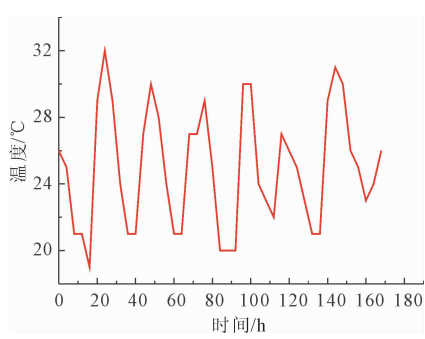


图 2 环境温度

2.4 计算方法

2.4.1 绝热温升方程

在描述混凝土的所有绝热温升模型中,复合指数型公式较为精确^[17],即:

$$Q(\tau) = Q_0(1 - e^{-a\tau^b}) \tag{8}$$

式中: $Q(\tau)$ 为混凝土在龄期 τ 时的累计水化放热量, kJ/kg ; τ 为龄期, d ; Q_0 为混凝土水化总热量, kJ/kg ; a 、 b 为常数,分别取 0.69、0.56。

2.4.2 边界条件近似处理

混凝土温度场的第三类边界条件通常采用等效表面散热系数法进行近似处理^[18]。等效表面散热系数 β_s 计算公式为^[17]:

$$\beta_s = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{(1/\beta) + \sum (h_i/\lambda_i)} \tag{9}$$

式中: R_s 为保温层总热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})/\text{kJ}$; h_i 为保

温层厚度, m ; β 为表面放热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; λ_i 为保温层导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

由于顶板各表面保温层的材料及厚度不同, 因此 β 不同, 保温层的材料参数见表 3; 其中, 顶板的上表面覆盖塑料薄膜和土工布养护, 但塑料薄膜厚度仅 1 丝 (0.01 mm), 保温效果可以忽略, 只需考虑土工布保温。地铁车站虽采用明挖施工, 但因在地下, 因此不考虑风速影响。

表 3 各保温层参数

计算参数	保温材料	
	土工布	胶合板
厚度 h/m	0.003	0.020
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	300	600
导热系数 $\lambda/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.144	0.612
表面散热系数 $\beta/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	21.06	18.46

由表 3 可推出混凝土各表面 β_s , 见表 4。

表 4 各保温层等效表面散热系数

	顶板上表面	顶板下表面	顶板侧面
等效表面散热系数 β_s $/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	14.638	11.514	11.514

注: 与旧混凝土相连的截面取为绝热面。

2.4.3 等效龄期成熟度

水泥的水化反应会导致混凝土的温度升高, 进而加速水泥的水化速率^[19], 因此将等效时间与水化度相结合, 从而对早期混凝土温度场进行更加精确的模拟分析。

根据 Arrhenius 方程, Hansen 等^[20] 提出新的成熟度理论的表征方法, 等效龄期 t_e 为:

$$t_e = \int_0^t \exp \frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) dt \tag{10}$$

式中: E_A 为反应活化能, J/mol ; R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T_r 为参考温度 (通常取 20°C , 即 293 K); T 为节点的实际绝对温度。

有限元模拟计算时, 采用时间步累计叠加的形式计算相应的等效龄期值。

当绝对温度 $T \geq 293 \text{ K}$ 时, $E_A = 33.5 \text{ kJ}/\text{mol}$; 当 $T < 293 \text{ K}$ 时, $E_A = 33.5 + 1.47 \times (293 - T)$ (kJ/mol)。混凝土浇筑后小于 15 d 时, $E_A/R = 2700 \text{ K}$ ^[21]。

2.5 HETVAL 子程序

在混凝土温度场分析中, 水泥水化热产生的热量是一个随着时间变化的热源^[22], 采用 HETVAL 子程序来实现这种热源功能。

3 有限元模拟

3.1 监测点布置及实测温度拟合

由于混凝土浇筑时间较长, 胶凝材料在浇筑过程中已经进行水化放热升温, 但受到环境、施工等因素影响, 温升过程并不稳定。因此, 浇筑完成后 2 h 作为实测温度起点, 测量时间 168 h。采用 JDC-2 建筑电子测温仪, 选取顶板处的 N1—N10 作为监测点, 如图 3 所示。

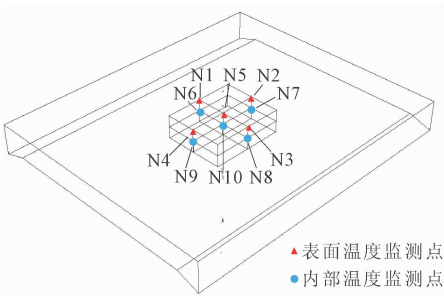


图 3 测温点布置图

对实测温度进行拟合 (见图 4), 混凝土内部温度拟合度 $R^2 = 0.983$, 混凝土表面温度拟合度 $R^2 = 0.959$, 满足精度要求。

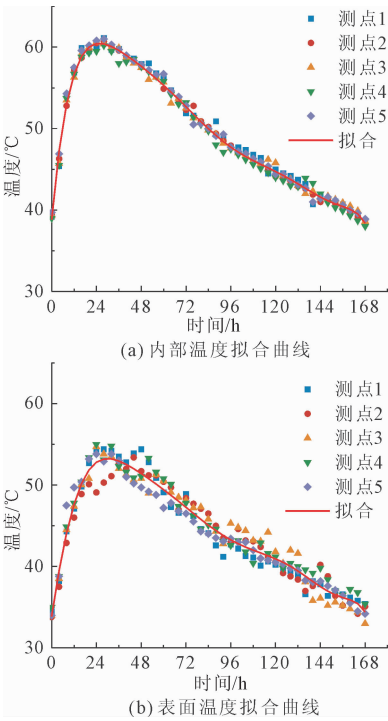


图 4 混凝土温度拟合曲线

3.2 混凝土顶板模型建立

有限元分析步中选择热传递瞬态分析, 时间为 170 h; 预定义场中, 混凝土初始温度为 25°C , 采用

DC3D8 八节点线性传热六面体单元,因现场浇筑完成后 2 h 开始测温,所以模拟的时间坐标选取 2 h 为 0 刻度开始统计。混凝土顶板模型见图 5。

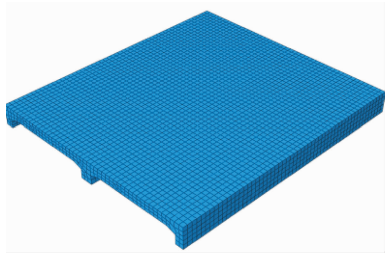


图 5 混凝土顶板模型

3.3 混凝土顶板温度模拟结果

根据对比(图 6),在考虑等效龄期后,模拟值与实测值的平均误差在 3.5% 以内,可以认定有限元模型与实际工程较为解近,温度场分析在该模型基础上进行数值模拟。

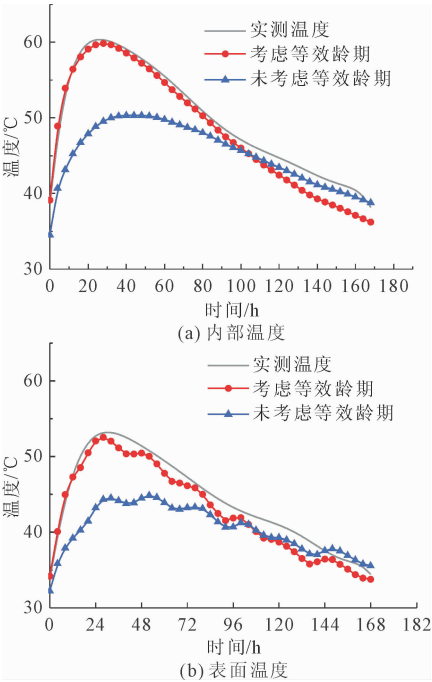


图 6 混凝土温度场计算结果

4 混凝土热学参数反演分析

4.1 BP 神经网络结构

BP(Back Propagation)神经自 1986 年由 Rumelhart 等提出以来,BP 神经网络已达到人工神经网络模型 80% 以上的占比,是目前应用最广泛的人工神经网络的模型^[23]。

为了获得可靠的混凝土热学参数,在进行混凝土温度场仿真计算时,可以使用 BP 神经网络提高

计算的准确性。BP 神经网络是一种多层前馈神经网络,它具有简单的结构和优良的多维函数映射能力,即使在自变量和因变量之间的关系不明确的情况下,BP 神经网络仍然可以建立它们之间的联系,通过学习和训练来建立模型,从而利用输入的自变量预测输出的因变量。

经典的 BP 神经网络结构包括输入层、隐含层和输出层三种部分(见图 7)。输入参数通过 BP 神经网络的输入层传输进入到其隐含层进行网络运算处理,并通过输出层输出得到最终的处理结果^[24]。理论上,三层(单隐藏层)的 BP 神经网络可以实现从输入到输出的任意非线性映射。

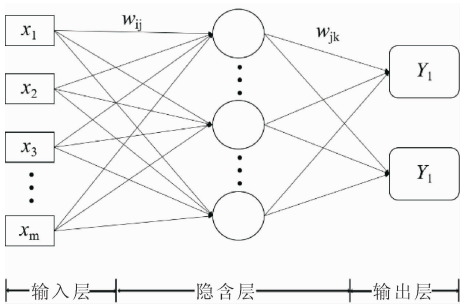


图 7 BP 神经网络结构图

BP 神经网络因其强大的非线性逼近能力、泛化能力、容错能力以及柔性的网络结构模型深受学者们的青睐。但是该算法也有其不足,主要体现在收敛速度慢、完全不能训练、易陷入局部极小值等,因此需要对经典神经网络进行优化,目前应用较为广泛的改进方法分是 L-M 优化算法。

L-M(Levenberg-Marquardt)算法是一种非线性最小二乘优化算法,它结合了高斯-牛顿方法和梯度下降法的特点,可以快速、有效地收敛到最优解^[25],其权值修正公式见式(11):

$$\Delta x = - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \tag{11}$$

式中: J 为雅可比(Jacobian) 矩阵; μ 为比例系数,当 $\mu \rightarrow 0$ 时,L-M 算法就是高斯-牛顿法,当 $\mu \rightarrow \infty$ 时,则演变成了梯度下降法; I 为单位矩阵; e 为网络的误差向量。

4.2 神经元数量和隐含层的确定

4.2.1 输入层神经元数量

混凝土不同的热学参数直接影响到其温度变化,但混凝土表面温度受外界影响较大,因此本研究以有限元正分析的混凝土内部温度作为输入参数,有限元模拟时长为 172 h,每 4 h 记录一次温度,加上初始温度,输入神经元的数量为 44。

4.2.2 输出层神经元数量

输出层神经元的数目取决于自变量的个数。为便于工程应用,所采用的神经网络不宜过于复杂,且需具有较高的预测精度,本研究选取的反演参数为导热系数、比热及胶凝材料水化放热量,因此输出层神经元的数量为 3。

4.2.3 隐含层的确定

隐含层神经元的数量 k 有多种计算方法,主要依据式(12)—式(14) 计算得到^[26],再根据实际训练结果选取最合适数值。

$$k = \sqrt{m + n + a} \tag{12}$$

$$k = \log_2 n \tag{13}$$

$$k = \sqrt{mn} \tag{14}$$

式中: m 为输入层神经元数量; n 为输出层神经元数量; a 为正整数,且 $1 \leq a \leq 10$ 。

根据上式确定隐含层神经元数量的取值范围和神经网络的训练误差确定最终的 k 值为 3。

4.3 混凝土热学参数反分析

4.3.1 训练样本的选择

对混凝土温度场进行反演,首先需要对混凝土温度场进行有限元正分析,提供反分析所需的训练数据。正分析模型采用 N9 段混凝土顶板。根据国内外多项大体积混凝土工程的调研^[14,27],确定了本研究各反演参数的取值范围,见表 5。

表 5 待反演热学参数取值范围

待定参数	导热系数 λ $/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1})$	比热 c $/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1})$	胶凝材料 水化放热 Q $/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
变化上限	14	1.2	350
变化下限	6	0.8	270

4.3.2 正交设计

待反演热学参数作为 3 因素,水平数为 5,正交设计的模拟次数为 25 次,表 6 为最终选用的参数设计样本。

4.3.3 神经网络学习样本

利用 ABAQUS 对以上 25 组不同工况下的混凝土温度场进行数值模拟,温度数据用于 BP 神经网络训练,神经网络学习样本见表 7。

将 25 组样本随机生成 19 组进行训练,3 组进行验证,3 组进行测试。根据 MATLAB 分析结果(图 8、表 8),回归 R 值接近 1,说明 BP 神经网络模型对数据拟合精度较高,不同组之间的输入项与输出项有很强的相关性,因此可以用该模型来反演大

体积混凝土热学参数。

表 6 参数设计样本值表

编号	导热系数 λ $/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1})$	比热 c $/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1})$	胶凝材料 水化放热 Q $/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
1	14	1.2	350
2	14	1.1	310
3	14	1.0	270
4	14	0.9	330
5	14	0.8	290
6	12	1.2	270
7	12	1.1	330
8	12	1.0	290
9	12	0.9	350
10	12	0.8	310
11	10	1.2	290
12	10	1.1	350
13	10	1.0	310
14	10	0.9	270
15	10	0.8	330
16	8	1.2	310
17	8	1.1	270
18	8	1.0	330
19	8	0.9	290
20	8	0.8	350
21	6	1.2	330
22	6	1.1	290
23	6	1.0	350
24	6	0.9	310
25	6	0.8	270

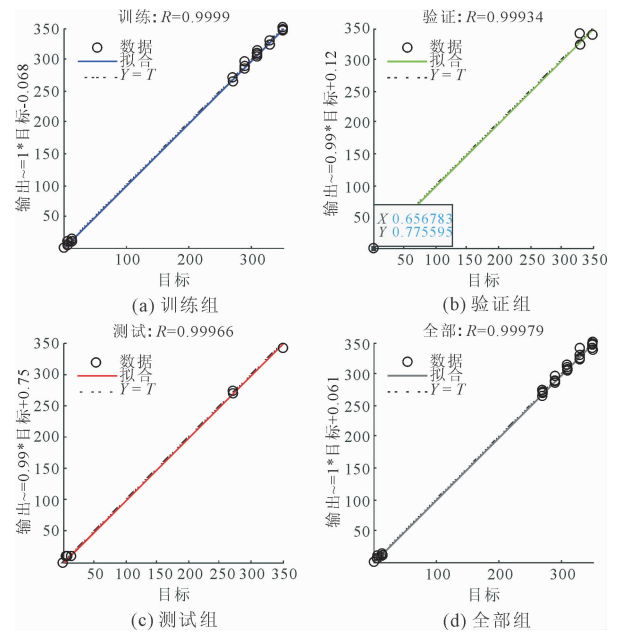


图 8 神经网络训练效果图

表 7 神经网络学习样本

序号	输入项									输出项		
	x_1	x_2	x_3	x_4	...	x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{44}	λ	c	Q
1	25.00	33.19	40.52	45.32	...	39.88	39.47	39.03	38.59	14	1.2	350
2	25.00	32.87	39.85	44.36	...	38.09	37.70	37.29	36.88	14	1.1	310
3	25.00	32.50	39.06	43.24	...	36.24	35.89	35.51	35.12	14	1.0	270
4	25.00	35.67	46.05	52.51	...	37.54	37.07	36.58	36.08	14	0.9	330
5	25.00	35.52	45.54	51.71	...	35.42	35.01	34.55	34.09	14	0.8	290
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21	25.00	32.66	39.53	44.14	...	42.60	42.17	41.73	41.29	6	1.2	330
22	25.00	32.30	38.79	43.10	...	40.55	40.14	39.72	39.31	6	1.1	290
23	25.00	35.12	44.92	51.41	...	42.97	42.43	41.87	41.33	6	1.0	350
24	25.00	34.93	44.48	50.73	...	40.61	40.10	39.58	39.06	6	0.9	310
25	25.00	34.69	43.69	49.66	...	38.10	37.63	37.16	36.68	6	0.8	270

表 8 神经网络模型的均方误差和回归 R 值

	观测值	MSE	R
训练	19	4.0762	0.9999
验证	3	33.8465	0.9993
测试	3	14.8805	0.9997

注:MSE 为均方误差,是输出和响应之间的均方差; R 为回归 R 值,是输出和响应之间的相关性。

将 N9 段拟合后的混凝土内部实测温度输入训练好的神经网络模型中,可以反演得到实际工程的温度参数,参数反演结果见表 9。

表 9 参数反演结果

热学参数	$\lambda/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$c/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$Q/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
反演值	12.132	0.897	323.495

4.4 基于反演参数的混凝土温度场计算

为验证反演的热学参数是否准确,将表 9 中的参数分别代入 N9 段混凝土顶板、N22 段混凝土顶板及 N18 段混凝土侧墙的有限元模型中,对比温度场计算结果与实测温度的误差,检验两者的吻合程度。

4.4.1 N9 段混凝土顶板

N9 段混凝土顶板温度场模拟结果与实测温度对比见图 9。

7 d 的内部温度的平均误差为 3.02%,表面温度的平均误差为 2.67%;在前 100 h,内部温度的平均误差为 1.10%,表面温度的平均误差为 1.06%。

4.4.2 N22 段混凝土顶板

选取 N22 施工段混凝土顶板中间部位为测温点,分别监测了混凝土内部和表面 9 d 温度数据,并

每 4 h 统计一次。N22 段顶板自浇筑开始每 4 h 记录一次环境温度(见图 10),连续统计 9 d。

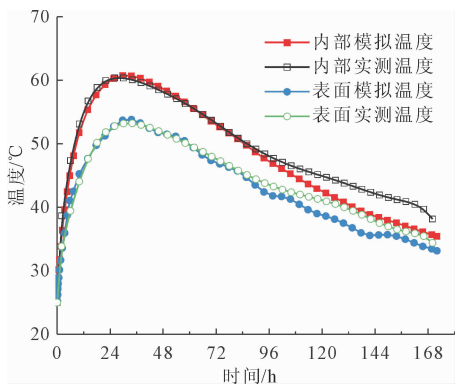


图 9 N9 段混凝土顶板模拟值与实测值温度对比

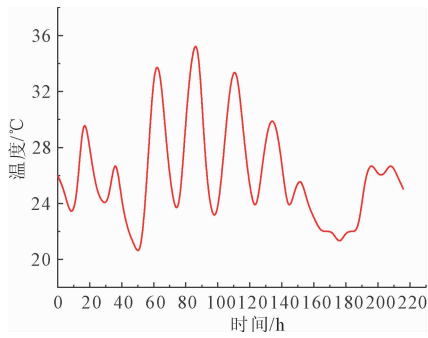


图 10 环境温度

N22 段混凝土顶板温度场模拟结果与实测温度对比见图 11。

经对比,9 d 的内部温度的平均误差为 3.25%,表面温度的平均误差为 3.60%。

4.4.3 N18 段侧墙混凝土

选取 N18 施工段混凝土侧墙中间部位为测温点,分别监测了混凝土内部和表面 7 d 温度数据,并

每 4 h 统计一次。侧墙自浇筑开始每 4 h 统计一次环境温度见(图 12),连续统计 7 d。

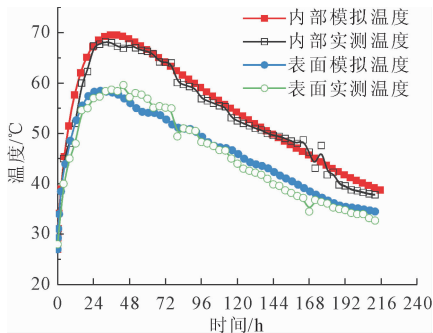


图 11 N22 段混凝土顶板模拟值与实测值温度对比

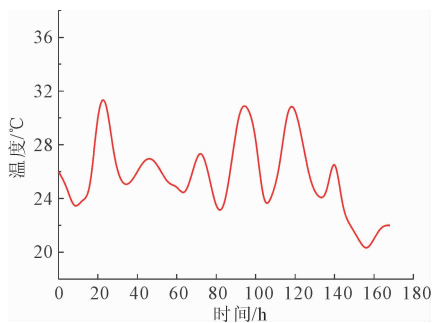


图 12 环境温度

N18 段混凝土侧墙的温度场模拟结果与实测温度对比见图 13。

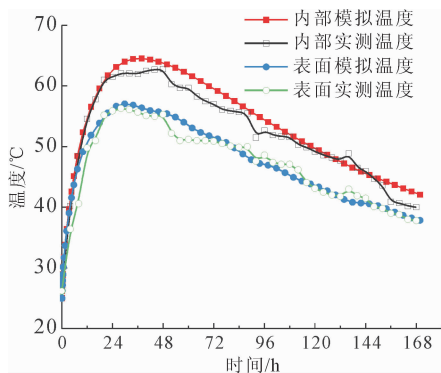


图 13 N18 段混凝土顶板模拟值与实测值温度对比

对比实测误差,7 d 的内部温度的平均误差为 2.96%,表面温度的平均误差为 2.49%。

通过对以上三种构件进行有限元模拟,经与实测温度对比分析,其内部测点和表面测点的模拟值与实测值吻合效果良好,可以认为 BP 神经网络反演的参数精准有效。

5 结 论

采用正交设计-ABAQUS 数值模拟-基于 MAT-

LAB 的 BP 神经网络反演的方法获得混凝土热学参数,最后验证反演参数的准确性。得到以下结论:

(1) 基于 MATLAB 平台所得到的 BP 神经网络其 R 值接近 1,说明正分析数据训练有效,且模型稳定性很好,可用于混凝土温度场反分析。

(2) 影响温度场的自变量有很多,本次研究对混凝土温度场反演的参数为导热系数、比热及胶凝材料水化放热量,既没有过于复杂,又可以做到混凝土温度场的精确模拟。

(3) 通过使用正交设计的方法,可以有效减少模拟次数,节约时间,同时利用 BP 神经网络进行热学参数反演,相比于室内试验更加经济。最后,将反演参数代入到 N9 段混凝土顶板、N22 段混凝土顶板及 N18 段混凝土侧墙进行温度场有限元模拟,并与实测温度误差较小,说明反演结果更符合实际情况,可为探究大体积混凝土温度场对其力学性能的影响规律,也可为地铁车站建筑的设计和施工提供参考。

参考文献:

- [1] 王 茹,逯同洋,程 凯. 地铁车站施工信息模型应用标准化研究[J]. 现代隧道技术,2023,60(1):47-55.
- [2] 朱振洪. 大体积混凝土结构温度场计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [3] 骆 成. 连续配筋混凝土路面温度场研究及设计参数敏感性分析[J]. 中外公路,2020,40(3):76-80.
- [4] 武坤朋,周集权,张照杰,等. 地铁车站侧墙混凝土温度应力的多因素影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(5):150-156,190.
- [5] Wilson E L. The determination of temperatures within mass concrete structures[R]. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1986.
- [6] 朱伯芳. 混凝土绝热温升的新计算模型与反分析[J]. 水力发电,2003,29(4):29-32.
- [7] 马成成,李守义,赵丽娟,等. 大体积混凝土结构表面保温计算方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(6):217-223.
- [8] 朱鹏飞,宫经纬,唐新军. 大体积混凝土胶凝材料体系水化放热规律研究[J]. 长江科学院院报,2018,35(6):111-116.
- [9] Saeed M K, Rahman M K, Baluch M H. Influence of steel and polypropylene fibers on cracking due to heat of hydration in mass concrete structures[J]. Structural Concrete, 2019,20(2):808-822.
- [10] 王新刚,诸葛爱军. 航电枢纽大体积混凝土温度场仿真模拟参数优化研究[J]. 中国港湾建设,2020,40(9):50-53.

(下转第 205 页)

[12] 陈 翠,刘正伟,陈晓生,等. 基于图像处理的水位信息自动提取技术[J]. 水利信息化,2016(1):48-55.

[13] 赵科锋,曹慧群,林 莉,等. 人工智能视频识别在水利数字孪生中的典型应用[J]. 长江科学院院报,2023,40(3):186-190.

[14] 万里勇,汪 浩,罗文兵. HSV 空间的明度对数斜率变换的低照图像增强[J]. 传感技术学报,2024,37(7):1202-1209.

[15] 蒋道丹. 基于改进 Sobel 算子的输送带图像边缘检测研究[J]. 矿业装备,2024(5):10-12.

[16] 周光波,张培珍,莫晴舒,等. 基于 Radon 投影与改进卷积神经网络的小样本水下目标声呐图像识别方法[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报,1-9[2024-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240827.1001.012.html>.

[17] 张 莉,孟范泽,刘思霖,等. 基于投影法和卷积神经网络的手写汉字图像分割研究[J]. 电子技术应用,2021,47(11):73-75,80.

[18] 陈奕怡. 基于图像处理的水位尺读取研究[D]. 南京:东南大学,2022.

[19] 徐 萌,路 稳,方 澄,等. 融合光流特征和显著性检测的目标跟踪算法[J]. 计算机应用与软件,2024,41(2):164-171,187.

[20] 赵艳芹,童朝娣,张 恒. 基于 LeNet-5 卷积神经网络的车牌字符识别[J]. 黑龙江科技大学学报,2019,29(3):382-386.



(上接第 152 页)

[11] 门江东,曾 勇,曾渝茜,等. 养护工艺参数对连续刚构桥 0#块混凝土早期温度场影响[J]. 北京交通大学学报,2021,45(2):8-18.

[12] 王 凯,张 勇,刘建磊,等. 基于 BP 神经网络的混凝土箱梁最大温度梯度预测[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(2):837-850.

[13] 门 凡. 混凝土长梁在温度应力下的抗裂研究[D]. 西安:长安大学,2022.

[14] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 第 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[15] 大体积混凝土施工标准:GB 50496—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[16] 民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[17] 朱伯芳. 混凝土热学力学性能随龄期变化的组合指数公式[J]. 水利学报,2011,42(1):1-7.

[18] Kou S, Huo M L, Jin L A, et al. Comparative study on calculation methods of temperature field of mass concrete structures in subway stations [C]//Proceedings of the International Conference on Industrial Design and Environmental Engineering, IDEE 2023, November 24-26, 2023,Zhengzhou, China. 2024.

[19] 张增起,石梦晓,王 强,等. 等效龄期法在大体积混凝土性能预测中的准确性[J]. 清华大学学报(自然科学版),2016,56(8):806-810.

[20] Y Hansen P E, Pedersen E J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete strength[J]. Nordisk Betong, 1977,1(19):19-34.

[21] 崔 微,吴甲一,宋慧芳. 考虑水化度对热学参数影响的早期混凝土温度场分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015,45(4):792-798.

[22] 陈 辉,邓 刚,张延亿,等. 考虑温度变化和长期变形的面板堆石坝模拟门[J]. 水力发电学报,2021,40(10):124-134.

[23] 钟惟亮,丁 昊,范立峰. 基于 BP 神经网络的地聚物混凝土细观参数标定研究[J/OL]. 工程力学:1-10 [2024-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20231226.0959.016.html>.

[24] 王 放,周宜红,赵春菊,等. 考虑测点灵敏度的大体积混凝土热学参数反演方法研究[J]. 水力发电学报,2017,36(12):95-104.

[25] 王新刚,王起才,周 岩,等. 基于人工神经网络的大体积混凝土温度场预测[J]. 混凝土,2006(9):21-24.

[26] 张文伟. 早龄期混凝土温湿度场试验研究及数值模拟[D]. 西安:西安理工大学,2022.

[27] 何 鹏. 水电工程大体积混凝土温度裂缝控制及实例分析[M]. 中国建筑工业出版社,2013.