

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.142



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



钢拱塔斜拉桥的温度耦合效应和索力预测

方圣恩^{1a,1b}, 秦劲东^{1a}, 张玮², 江星³

(1. 福州大学 a. 土木工程学院; b. 土木工程防震减灾信息化国家地方联合工程研究中心, 福州 350108;
2. 福建省建筑科学研究院有限公司, 福州 350100; 3. 福建省榕圣市政工程股份有限公司, 福州 350011)

摘要: 钢拱塔斜拉桥的受力体系与传统斜拉桥有所不同, 为研究环境温度变化对这种异形桥塔斜拉桥主要受力部件的影响, 以某钢拱塔斜拉桥为工程背景, 首先基于在线监测获取的环境和部件温度数据, 分析斜拉索索力、拱塔倾角和主梁应变的温度时变效应; 然后以斜拉索为研究对象, 通过该桥的有限元模型升降温模拟, 分析各部件温差引起的温度耦合效应对拉索索力的影响; 最后以环境温度、主梁温度、桥塔温度为输入, 索力为输出, 利用长短期记忆神经网络对实测索力-温度数据进行映射, 实现数据压缩和特征提取, 建立温度-索力预测模型, 再对网络模型输入新的温度监测数据, 以预测索力。研究结果表明: 主梁和钢拱塔温度变化具有周期性, 且滞后于环境温度; 主梁应变与环境温度的变化趋势基本一致但具有一定的滞后性, 环境温度变化对拱塔倾角的影响很小且没有周期性规律; 索力与环境温度呈线性负相关, 且需要考虑斜拉桥各部件的温差所引起的温度耦合效应; 长短期记忆神经网络对带有时序特性的数据训练效果好, 建立的温度-索力关系模型准确度高, 可用于该桥索力的实时预测。

关键词: 桥梁工程; 温度耦合效应; 长短期记忆神经网络; 钢拱塔斜拉桥; 索力预测

中图分类号: U443.38 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)02-0146-08

Temperature coupling effects and cable force prediction of cable-stayed bridge with steel arch tower

FANG Shengen^{1a,1b}, QIN Jindong^{1a}, ZHANG Wei², JIANG Xing³

(1a. School of Civil Engineering; 1b. National & Local Joint Engineering research Center for Seismic and Disaster and Informatization of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China; 2. Fujian Academy of Building Research Co., Ltd., Fuzhou 350100, P. R. China; 3. Fujian Rongsheng Municipal Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350011, P. R. China)

Abstract: The mechanical system of a cable-stayed bridge with a steel arch tower is different from that of a traditional cable-stayed bridge. In order to investigate the effects of ambient temperature variations on the main components of a cable-stayed bridge with a tower in an abnormal shape, an actual cable-stayed bridge with a steel arch tower has been used as the engineering prototype. The online temperature data of the onsite environment and the bridge components were first collected and used to analyze the time-varying effects of the

收稿日期: 2022-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(52178276); 福建省自然科学基金(2021J01601); 福州市科技计划项目(2021-Y-084)

作者简介: 方圣恩(1980-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构健康监测研究, E-mail: shengen.fang@fzu.edu.cn。

Received: 2022-09-08

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52178276); Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2021J01601); Fuzhou Science and Technology Program Project (No. 2021-Y-084)

Author brief: FANG Shengen (1980-), professor, doctoral supervisor, main research interest: structural health monitoring; E-mail: shengen.fang@fzu.edu.cn.

environmental temperature on the cable forces, the tower obliquity and the stress of the main girder. Subsequently, the analysis was focused on the cable forces. The temperature variation simulation was applied to the finite element model of the bridge, and the temperature coupling effects caused by the temperature difference between different bridge components on the cable forces were analyzed. Lastly, the temperatures of the environment, the tower and the main girder were used as the inputs, while the cable forces were defined as the outputs of a long short-term memory neural network. The network was trained using the actual measurement samples of the temperatures and the cable forces. Data compression and feature extraction were realized during the training process. Then, the prediction model for the cable forces was established, and new temperature monitoring data were input into the network model for predicting the cable forces. The analysis results show that the temperature variations of the main girder and the steel arch tower follow a periodic rule and lag behind the ambient temperature. The strain variation tendency of the main girder accords well with the ambient temperature, but the latter has a time lag. The influence of the ambient temperature variation on the obliquity of the arch tower is very small without any periodic rule. A linear negative correlation is found between the cable forces and the ambient temperature. The temperature coupling effect caused by the temperature difference between different bridge components should be considered in the analysis. The long and short-term memory neural network is suitable for the data with timing characteristics. The cable force prediction model based on the neural network has high prediction accuracy, and it can be used for the real-time prediction of this bridge.

Keywords: bridge engineering; temperature coupling effects; long short-term memory neural network; cable-stayed bridge with a steel arch tower; cable force prediction

大跨斜拉桥的力学性能和状态易受环境因素,如温湿度变化的影响。已有研究表明,温度效应引起斜拉桥结构状态变化量可能超过车辆活载作用,且温度的周期性改变会导致结构力学性能发生变化,影响桥梁的安全运营^[1-6]。

近年来,针对斜拉桥的温度效应影响开展了大量研究。在主梁方面,黄侨等^[7]采用小波方法对斜拉桥主梁挠度响应中的温度效应进行分离,通过研究日温度效应与大气温度间的关系,获取用于预测日温度效应的多折线预测模型;Zhou等^[8]针对漂浮和半漂浮双塔斜拉桥体系,通过研究拉索、主梁和桥塔温度变化对跨中竖向位移的影响,提出了竖向位移的通用计算公式;许翔等^[9]以南京长江三桥的温度监测数据为依据,分析构件温度随时间的变化规律,以及构件温度与大气温度间的相关关系,发现钢箱梁温度与大气温度线性相关,且斜率参数随辐射强度的增强而增大。在斜拉桥桥塔的温度效应方面,Li等^[10]以港珠澳大桥中的青州航道桥为研究对象,建立桥塔的太阳温度场计算模型,其间考虑了太阳仰角、方位角、辐射吸收系数等参数;张清华等^[11]采用有限元方法对3种不同材料类型的桥塔进行分析,通过研究桥塔温度场与温度应力,发现相对于传统的混凝土桥塔,UHPC-RC组合桥塔的RC层应力极值显著降低。

相较于主梁和桥塔,斜拉索作为柔性易损的主要受力部件,其索力易受温度变化的影响。赵珧冰

等^[12]引入拉索在温度变化作用下的平衡状态方程,求解得到温度变化下索力与频率的关系式,发现温度变化可明显改变索力与拉索振动频率的大小,且拉索水平张力随温度变化量的增加而减小;Suangga等^[13]通过有限元分析发现温度与索力之间呈线性关系,其中主梁和桥塔的刚度变化对索力有着显著影响;Montassar等^[14]基于弹性悬链线理论提出了一种非线性分析方法,以研究在均匀温度变化下的索力改变,再通过与实桥监测数据的比较验证了所提方法的有效性。

斜拉桥的结构形式、跨径布置和桥址环境不同时,温度作用下体系和部件的响应和状态变化并不一致,关联性模型较为复杂。同时,实桥在线监测获取的时序数据量大、分析处理有难度,有必要采用更有效的温度效应分析方法,比如神经网络^[15]。胡铁明等^[16]通过BP神经网络对斜拉桥的支座位移与环境温度相关性数据进行训练,发现当显著性水平误差取5%时,神经网络评估模型可有效地反映桥梁结构的健康状况;李顺龙等^[17]通过构建人工神经网络,研究温度和风速两种环境因素对斜拉桥结构模态频率和阻尼比的影响,发现环境因素对斜拉桥模态频率影响较大,神经网络模型可以较好地模拟环境主成分与模态参数之间的关系。

作为一种新颖的异形拱塔斜拉桥体系,近年来钢拱塔斜拉桥开始应用于城市桥梁,其在桥塔受力、斜拉索锚固等方面不同于常规桥塔形式的斜拉桥。钢拱塔斜拉桥的索面非传统的索平面,而是呈

空间曲面分布形式,此时主梁及桥塔不同锚固位置的索力大小及方向存在较大差异,不仅存在纵向水平力和竖向力作用,还有横向水平力作用。目前,外界环境条件变化对这种带异形桥塔斜拉桥的状态影响研究非常少,特别是温度变化方面。为此,笔者以一座实际钢拱塔斜拉桥的在线监测数据为基础^[18],研究主梁、钢拱塔和斜拉索的温度效应,提出索力拟合公式,再利用长短期记忆神经网络(Long Short-Term Memory Neural Network, LSTMNN)对索力数据进行训练,获取索力预测模型,实现对索力的精确预测,为此类斜拉桥的温度效应研究提供参考。

1 实桥概况

某钢拱塔斜拉桥全长 453 m,桥跨布置为 50 m+60 m+110 m+110 m+60 m+50 m,桥面总宽为 29.5 m。主梁为预应力钢筋混凝土连续箱梁,全桥桥面连续,仅在两侧桥台设置伸缩缝;桥塔高 82.2 m,采用等腰梯形闭合截面钢箱拱结构,通过钢混结合段过渡方式与混凝土拱座相连,为平衡拱塔水平推力,通过拉索形成 Y 形传力体系;主梁与拱塔间通过斜拉索联系,全桥共 32 对拉索,在梁上锚固于中央分隔带处。

该桥布设了健康监测系统,其中环境温度采用蓝牙探头式温度计,测量范围为 $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$,采样周期为 1 min,布置在 3[#]跨靠近桥塔位置处(图 1)。主梁温度和应变测量采用混凝土表面测量仪,采样周期为 10 min,分别布置在 B、C、D、E、G、J、L、N、O、P、Q 截面,于箱外混凝土表面各布置 3 个纵桥向测量仪。但在跨中截面 D、G、L、O 增设了 4 个横桥向测量仪,布设于混凝土箱室内上表面,如图 2(a)所示。斜拉桥索力采用频率法测量,选择最长索、最短索和中长索作为监测对象,全桥 4 个索面共计 12 根。钢拱塔变形采用倾角仪,安装在拱塔的根部、中部及顶部截面处(即 S~W 截面,如图 2(b)所示);温度测量采用布设于 S、U、V 和 T 4 个位置的温度测量仪,倾角仪和温度测量仪的采样周期均为 10 min。

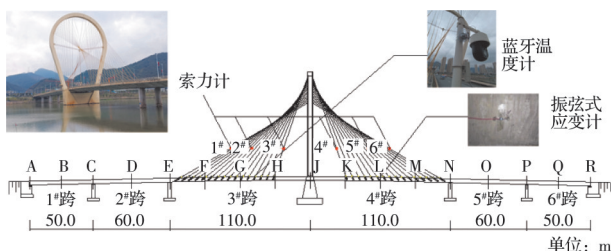
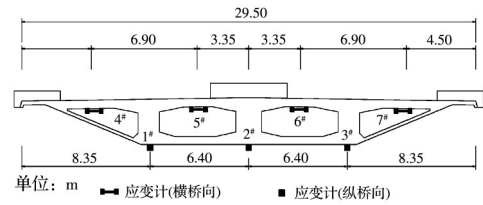
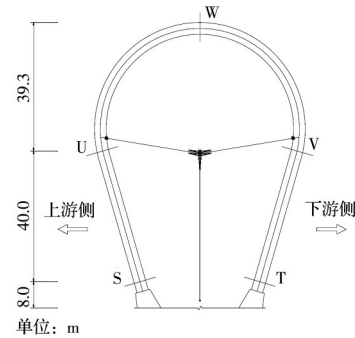


图 1 钢拱塔斜拉桥立面图及监测位置

Fig. 1 Vertical view and monitoring layout of the cable-stayed bridge with a steel arch tower



(a) 主梁截面传感器布置



(b) 桥塔传感器布置

图 2 主梁及桥塔温度传感器位置

Fig. 2 Temperature sensor layout of the main girder and the arch tower

2 主要受力部件温度效应影响分析

该钢拱塔斜拉桥几何空间上对称,在研究主梁和斜拉索的温度效应影响时,取 3[#]跨及上游一侧的 3 根拉索进行分析。分析上部结构各部件的温度效应影响时,取该桥 2022 年 1 月 3 日至 12 日共计 240 h 的温度、索力、主梁应变和桥塔倾角等监测数据。

2.1 主梁和桥塔温度效应分析

主梁温度取跨中截面测点温度的平均值,应变取 2[#]传感器的监测值;桥塔温度选取塔上所有测点的平均温度,对应桥塔顶端的倾角测值,暂不考虑温度梯度的影响。

主梁和桥塔的温度效应分别见图 3、图 4。由图 3、图 4 可见:环境、主梁和桥塔温度的变化均带有周期性(以天为周期)。在所研究时间段内,环境温度的最大、最小值分别为 $26.5、5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;主梁温度的最大、最小值分别为 $16.3、11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度变化量小于环境温度;桥塔各测点的监测温度值相差不大,最大、最小值分别为 $20.7、6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,桥塔温度变化量比主梁大,但仍小于环境温度变化量;两种部件的温度变化均滞后于环境温度,因为部分温度测点位于结构内部,且混凝土的导热性弱于钢材;主梁应变与环境温度的变化趋势基本一致,压应变值随温度升高而减小,但具有一定的滞后性,这是因为主梁材料吸放热需要一定的时间。同时,主梁压应变范围为 $-79.1\times 10^{-6}\sim -24.0\times 10^{-6}$,变化绝对量为 55.1×10^{-6} ,对于 110 m 跨度而言相当于主梁沿纵

向变形了6 mm,变形量不大,这是由于桥梁伸缩缝的存在,主梁在温度变化作用下可沿纵桥向发生一定的伸缩变形。

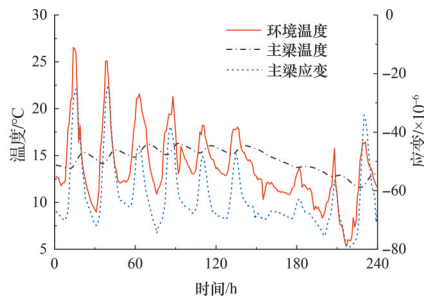
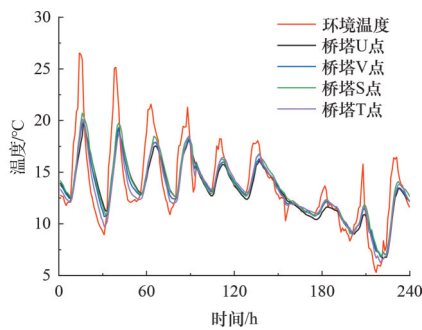
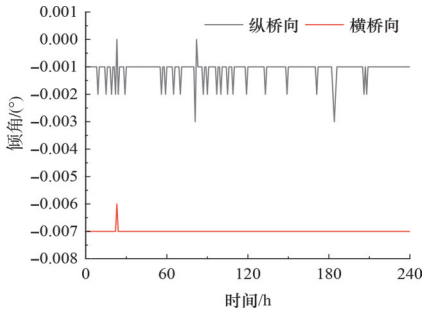


图3 主梁温度效应

Fig. 3 Temperature effects on the main girder



(a) 桥塔塔身测点温度变化



(b) 桥塔倾角变化

图4 钢拱塔温度效应

Fig. 4 Temperature effects on the steel arch tower

桥塔上安装的倾角仪分别监测钢拱塔截面沿纵、横桥向的倾角变化,如图4所示。由图4可知,钢拱塔沿纵桥向倾角变化大于横桥向,但最大改变量仅为 0.002° 。在选取的监测时间段内,钢拱塔倾角值变化很小且没有周期性规律。总体上,由于钢拱塔自身刚度大且受到两侧斜拉索的对称约束作用,因此环境温度变化对拱塔倾角的影响很小。

2.2 拉索温度效应分析

拉索由于截面尺寸小且外包保护套,套内温度难以测量且温度梯度效应小,故采用环境温度作为拉索温度效应的分析依据。考虑到该桥结构沿桥塔对称,故选取3[#]跨上游侧的3根拉索(1[#]~3[#]索)进行研究。对斜拉索加速度时程响应数据进行滤波

降噪等数据预处理后,通过模态识别得到各根拉索的频率,并根据索力计算公式得到拉索索力^[19]。

$$C = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{n^2 EI \pi^2}{L^2} \quad (1)$$

式中: C 为索力; m 为单位长度拉索质量; L 为拉索的计算长度; f_n 为第 n 阶振动频率; n 为拉索自振频率阶数; E 为拉索材料的弹性模量; I 为拉索截面抗弯惯矩。

图5(a)为10 d内各根拉索的索力变化。可见索力大小依次为3[#]索、1[#]索和2[#]索,各索索力随时间的变化趋势基本相同。图5(b)~(d)为索力-环境温度散点图,可见环境温度与索力之间的线性关系较强,拉索索力随环境温度的升高而减小,且最长的1[#]索的索力受温度影响最大,2[#]索次之,最短的3[#]索的索力受温度影响最小。究其原因,索越长在温度变化时长度变化量相对越大,使得振动频率和索力变化也越大。与此同时,通过对该斜拉桥的交通状况调查得知,该桥交通量较小且重车荷载很少,拉索主要承担斜拉桥恒载的重量。考虑到选取的加速度数据时长为10 min(采样频率20 Hz),基于模态参数识别获取的拉索频率计算得到的是该时段内的平均索力,发现车辆荷载对索力的影响很小。因此,在研究索力的温度效应时,可不考虑车辆荷载对索力的影响。

2.3 温度耦合效应下索力分析

为进一步研究环境温度变化对钢拱塔斜拉桥各部件的影响,以易损的斜拉索为分析对象,首先通过Midas Civil建立该桥的有限元模型,其中拉索采用桁架单元,主梁和桥塔采用梁单元,共计512个单元。通过模型升降温来模拟环境温度变化对拉索索力的影响,升温方式包括仅对拉索升温 10°C 和桥梁整体系统升温 10°C 两种:前者模拟局部温度变化对斜拉桥部件的影响,相当于拉索两端连接的边界条件(主梁和拱塔)未发生变化;后者考虑了梁、塔温度变形耦合效应对实际索力的影响。

当各部件(拉索、拱塔、主梁)的升温幅度一致时,3根索的索力变化值分别为 -15.1 、 -4.3 、 -1.6 kN,而各部件的温度变化不同时(仅拉索升温),索力变化值为 -105.2 、 -45.8 、 -46.5 kN,前后差异较大,可见需要考虑斜拉桥各部件的温差所引起的温度耦合效应,因此,在研究拉索索力的温度效应时要从体系角度进行分析,考虑索力与环境温度 T 、主梁温度 T_1 以及拱塔温度 T_2 间的关联性。为此,以不同部件间温度差为变量,分析温度耦合效应下的索力变化。索力与部件温度差的关系如图6所示。由图6可见,索力与环境-主梁温差($T -$

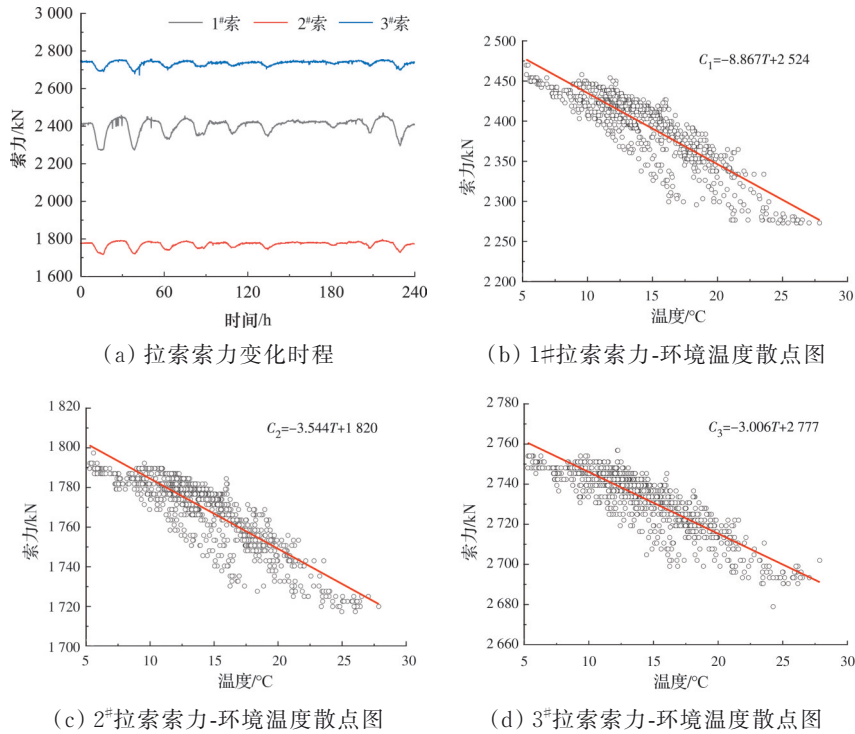


图 5 索力变化历程及索力-环境温度关系

Fig. 5 Time histories of the cable forces and their relations with environmental temperature

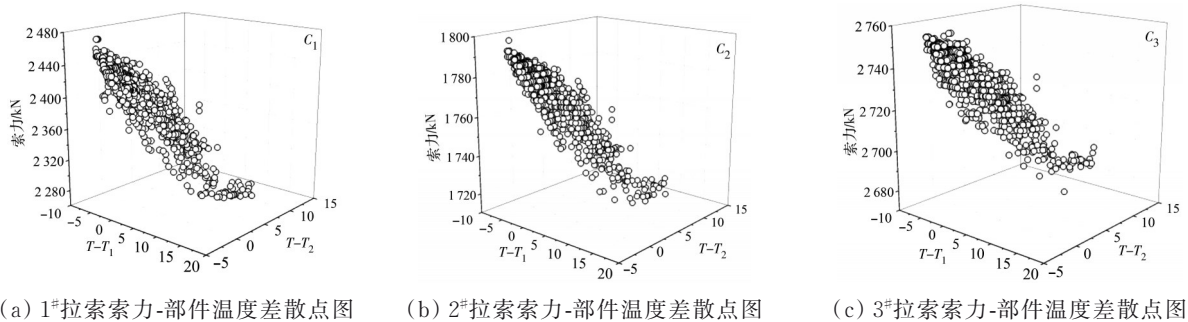


图 6 索力-部件温度差关系

Fig. 6 Cable forces and their relations with the temperature difference of components

T_1)、环境-拱塔温差($T - T_2$)之间为线性负相关。环境(索)温度大于主梁和拱塔时,温差越大,索力越小;环境(索)温度小于主梁和拱塔时,温差越大,索力越大。究其原因,当环境温度升高时,主跨两侧支座的约束作用使得主梁产生上挠,引起拉索索力下降,此时支座承受了更多的恒、活荷载,并传递给桥墩;同理,当环境温度降低时,主梁下挠引起索力增大,两侧支座承受的荷载减小。

3 结合 LSTMNN 的温度-索力预测

考虑到斜拉桥各部件间温度耦合效应,服役过程中同一环境温度下的索力变化也可能不同。同时,实测温度和索力数据本质上为时间序列,监测系统源源不断地提供相应数据,要实现对索力的实时预测,显然不能通过拟合分析的方式。有鉴于

此,提出采用能较好处理时间序列数据的长短期记忆神经网络(LSTMNN),通过对监测数据的压缩和特征提取,建立索力的预测模型。

3.1 温度-索力 LSTMNN 模型

LSTMNN 属于循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)的一种^[20],主要是为了解决长序列数据训练过程中的梯度消失和梯度爆炸问题。网络拓扑包括输入门、遗忘门和输出门 3 个部分,其中,输入门控制网络的输入(与温度相关),输出门控制网络的输出(与索力相关),而遗忘门决定历史记忆中需要保留和丢弃的信息,是整个神经网络的核心。

先对温度数据进行归一化处理,通过线性化方式将原始数据转化到 $[0, 1]$ 范围,然后输入 LSTMNN,可以加快神经网络的收敛。

$$x' = \frac{x - \min\{X\}}{\max\{X\} - \min\{X\}} \quad (2)$$

图 7 中的网络输入 x_t 为温度相关数据,包含环境温度、主梁温度和拱塔温度。遗忘门将 x_t 与上一时刻的输出 h_{t-1} 整合到一起,作为当前时刻的联合输入,经过 σ 函数(此处为 Sigmoid 函数)输出一个 $[0, 1]$ 内的数值,以该值决定记忆和遗忘的程度,即“1”表示“完全记忆”,“0”表示“完全遗忘”。遗忘门计算记忆衰减系数的表达式为^[20]

$$f_t = \sigma(\mathbf{w}_t \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_t) \quad (3)$$

式中: f_t 为 t 时刻的遗忘门输出; \mathbf{w}_t 和 b_t 分别为权重矩阵和偏置项。

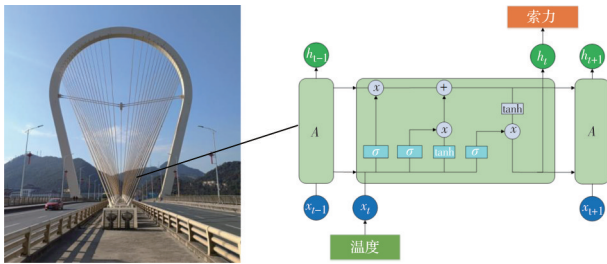


图 7 钢拱塔斜拉桥 LSTMNN 应用

Fig. 7 Application of the LSTMNN to the cable-stayed bridge with a steel arch tower

输入门分为两部分,不仅确定哪些记忆需要被更新,而且将更新后的记忆重新写入记忆中。这里会和遗忘门输出的数据进行整合,得到新的记忆,即

$$\begin{cases} i_t = \sigma(\mathbf{w}_\gamma \cdot [h_{t-1}, x_t]) + b_\gamma \\ \tilde{c}_t = \tan h(\mathbf{w}_\lambda \cdot [h_{t-1}, x_t]) + b_\lambda \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_t 和 \tilde{c}_t 分别为 t 时刻输入门的两部分输出; \mathbf{w}_γ 、 \mathbf{w}_λ 和 b_γ 、 b_λ 分别为对应的权重矩阵和偏置项。

将式(3)、式(4)做元素级别的两两相乘,便可以得到当前时刻 t 需要记住的东西,进而对旧的记忆进行更新,由此得到最新的记忆 c_t ,传递到下一时刻。

$$c_t = f_t \times c_{t-1} + i_t \times \tilde{c}_t \quad (5)$$

输出门控制网络的输出,相关输出信息仍可由 σ 确定,作用于当前的最新记忆,进而和 σ 函数相乘来表示输出的概率 p_t 。

$$\begin{cases} p_t = \sigma(\mathbf{w}_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\ h_t = o_t \cdot \tan h(c_t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: \mathbf{w}_o 和 b_o 分别为权重矩阵和偏置项。

过程中使用 $\tan h$ 激活函数对当前记忆的分布进行重整,然后和输出概率向量 p_t 做元素级别相乘,得到输出向量 h_t 。对于索力预测问题,可根据当前时刻的 h_t 得到索力预测值 \hat{C}_t ,即 $\hat{C}_t = f(\mathbf{w}h_t)$ 。

3.2 LSTMNN 训练、测试和预测

使用 Python 的深度学习工具 Keras 建立 LSTMNN,对钢拱塔斜拉桥的实测数据进行训练,搭建用于索力预测的网络模型。以跨中 2[#] 索为例,选取时长 10 d 共 1 440 组数据,以环境温度、桥塔温度、主梁温度为输入,2[#] 索的索力为输出。

LSTMNN 的网络参数设置,隐藏层节点数目不宜太大,可先取输入点数值的 2 倍,通过不断调整数目以提升训练效果;批量数一般不超过 100。此外,在保障网络训练速度的同时为避免过拟合现象,训练次数不宜太多,应根据训练效果和训练时间长短调整训练次数,以取得较好的训练结果。先对所有数据进行归一化,再分为训练集和测试集,二者比例设置为 7:3。优化后设置 LSTMNN 的隐藏层节点为 8,输出节点为 1,批量数为 50,采用平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)作为损失函数,同时用 Adam 的随机梯度下降做优化,训练次数为 300 次。最后将网络输出的数据进行反归一化得到索力值,经过多次训练后保存网络,测试集的预测精度 R^2 为 0.90,说明训练效果良好,可以用于预测索力。

为进一步检验 LSTMNN 的预测能力,采集 2022 年 1 月 13 日的在线监测数据,将温度数据输入网络,得到索力的预测值,并与实测值进行比较,列于表 1。以相对误差 δ 和均方根误差 η 评价预测能力。

表 1 LSTMNN 索力预测值

Table 1 Cable force predictions by the LSTMNN

环境温 度/°C	主梁温 度/°C	桥塔温 度/°C	实测索 力/kN	LSTMNN 预测值/kN	$\delta/\%$
11.42	13.06	11.84	1 779.12	1 776.80	0.131
16.89	12.79	12.83	1 743.00	1 741.26	0.100
14.98	13.31	14.10	1 750.72	1 757.61	0.393
13.67	13.33	14.02	1 750.72	1 755.65	0.282
5.99	13.21	8.95	1 792.24	1 795.79	0.198
6.24	13.19	8.87	1 794.74	1 793.86	0.049
17.29	12.91	13.55	1 737.91	1 741.04	0.180
8.36	13.51	11.14	1 781.77	1 784.29	0.142
10.30	12.88	10.56	1 781.77	1 783.81	0.115
12.05	13.43	13.49	1 763.57	1 775.87	0.697
15.80	12.73	12.30	1 745.62	1 745.47	0.009

$$\delta = \frac{|C_i - \hat{C}_i|}{C_i} \times 100\% \quad (7)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \hat{C}_i)^2} \quad (8)$$

式中: C_i 为索力实测值; \hat{C}_i 为索力预测值。由分析

结果可见, LSTMNN 预测索力的 δ 最大值为 0.697%, 平均值为 0.204%, η 为 4.234, 说明 LSTMNN 在预测索力方面具有良好的精度。

4 结论

环境温度变化对异形拱塔斜拉桥受力性能影响的研究非常少。以实际钢拱塔斜拉桥在线监测数据为依托, 分析了不同部(构)件温度效应, 并通过搭建 LSTMNN 模型, 实现对温度耦合效应下的索力分析和预测, 得到以下结论:

1) 钢拱塔表面温度变化周期性与环境温度一致, 由于钢拱塔刚度大且受到两侧斜拉索的约束, 纵、横桥向倾角受温度变化影响很小, 没有周期性规律, 这对此类桥梁设计和健康监测是有益参考。此外, 由于制作材料的不同, 混凝土主梁的表面温度变化滞后于钢拱塔, 纵桥向应变随温度升高而减小。

2) 拉索索力与温度之间呈线性负相关, 且端锚索受环境温度影响大于其他拉索, 环境温度与主梁、钢拱塔表面温度差对索力的影响不同, 因此, 索力分析应从体系角度开展, 考虑各部件间的温度耦合效应。

3) 实桥健康监测系统提供的温度和索力数据为时间序列, 擅长时序分析的 LSTMNN 对此有着良好的数据压缩和特征提取能力, 所建立的温度-索力关系模型提供了很好的索力预测精度, 可作为钢拱塔斜拉桥实时索力评估的参考。

4) 主梁和桥塔温度均选取测点温度的平均值, 暂未考虑温度梯度对钢拱塔斜拉桥受力性能的影响, 将来可以进一步研究。

参考文献

- [1] 刘永健, 刘江, 张宁. 桥梁结构日照温度作用研究综述[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 59-78.
LIU Y J, LIU J, ZHANG N. Review on solar thermal actions of bridge structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 59-78. (in Chinese)
- [2] 刘泽佳, 陈溢涛, 周立成, 等. 桥梁长期健康监测大数据温度与应变特征及关联性分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35): 72-79.
LIU Z J, CHEN Y T, ZHOU L C, et al. Analysis of characteristics and correlation for temperature and strain based on long-term bridge health monitoring big data [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(35): 72-79. (in Chinese)
- [3] KROMANIS R, KRIPAKARAN P. Predicting thermal response of bridges using regression models derived from measurement histories [J]. Computers & Structures, 2014, 136: 64-77.
- [4] LIU J, LIU Y J, JIANG L, et al. Long-term field test of temperature gradients on the composite girder of a long-span cable-stayed bridge [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(13): 2785-2798.
- [5] SOUSA TOMÉ E, PIMENTEL M, FIGUEIRAS J. Structural response of a concrete cable-stayed bridge under thermal loads [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 652-672.
- [6] XIA Y, CHEN B, ZHOU X Q, et al. Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20(4): 560-575.
- [7] 黄侨, 赵丹阳, 任远, 等. 温度作用下斜拉桥挠度的时间多尺度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 18-25, 32.
HUANG Q, ZHAO D Y, REN Y, et al. Multiple time scale analysis of temperature-induced deflection of cable-stayed bridges [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(3): 18-25, 32. (in Chinese)
- [8] ZHOU Y, SUN L M, FU Z H, et al. General formulas for estimating temperature-induced mid-span vertical displacement of cable-stayed bridges [J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111012.
- [9] 许翔, 黄侨, 任远, 等. 大跨钢斜拉桥实测结构温度场分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(9): 14-21.
XU X, HUANG Q, REN Y, et al. Thermal field analysis for large span steel cable-stayed bridges using in situ measurements [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 14-21. (in Chinese)
- [10] LI Y, HE S H, LIU P. Effect of solar temperature field on a sea-crossing cable-stayed bridge tower [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(8): 1867-1877.
- [11] 张清华, 马燕, 王宝州. 高原环境新型组合桥塔温度场与温度应力特性分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 30-36.
ZHANG Q H, MA Y, WANG B Z. Analysis of temperature field and thermal stress characteristics for a novel composite bridge tower catering for plateau environment [J]. Bridge Construction, 2020, 50(5): 30-36. (in Chinese)
- [12] 赵兆冰, 孙测世, 彭剑, 等. 温度变化对拉索频率与索力的影响[J]. 应用力学学报, 2013, 30(6): 904-908, 955.
ZHAO Y B, SUN C S, PENG J, et al. Effects of temperature changes on the frequencies and tension forces of cables [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(6): 904-908, 955. (in Chinese)
- [13] SUANGGA M, HIDAYAT I, JULIASTUTI, et al. Temperature effect on cable tension forces of cable-

- stayed bridge [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 195: 012009.
- [14] MONTASSAR S, MEKKI O B, VAIRO G. On the effects of uniform temperature variations on stay cables [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(5): 735-742.
- [15] 郑秋怡,周广东,刘定坤.基于长短时记忆神经网络的大跨拱桥温度-位移相关模型建立方法[J].工程力学, 2021, 38(4): 68-79.
ZHENG Q Y, ZHOU G D, LIU D K. Method of modeling temperature-displacement correlation for long-span arch bridges based on long short-term memory neural networks [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38 (4): 68-79. (in Chinese)
- [16] 胡铁明,苟红兵,张冠华,等.基于温度与支座位移相关性的斜拉桥损伤预警[J].沈阳大学学报(自然科学版), 2015, 27(1): 55-59.
HU T M, GOU H B, ZHANG G H, et al. Damage alarming for cable-stayed bridge based on correlation of temperature and displacement [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2015, 27(1): 55-59. (in Chinese)
- [17] 李顺龙,李惠,欧进萍,等.考虑温度和风速影响的桥梁结构模态参数分析[J].土木工程学报, 2009, 42(4): 100-106.
LI S L, LI H, OU J P, et al. Identification of modal parameters of bridges considering temperature and wind effects [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42 (4): 100-106. (in Chinese)
- [18] 秦劲东,方圣恩,张玮,等.基于3A指标的斜拉桥上部结构状态评估[J].土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(3): 71-78.
QIN J D, FANG S G, ZHANG W, et al. Superstructure condition evaluation of a cable-stayed bridge using 3A indicators [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 71-78. (in Chinese)
- [19] 上海市质量技术监督局.基于环境振动激励的桥梁拉索索力测试方法:DB31/T 973—2016 [S].上海:上海市质量技术监督局, 2016.
Shanghai Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Cable tension measurement of bridge with ambient vibration method: DB31/T 973—2016 [S]. Shanghai: Shanghai Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision, 2016. (in Chinese)
- [20] 刘扬,向胜涛,王达.基于BP-LSTM混合模型的钢-混组合桥面系空间温度场及温度效应实时评估及预测[J].土木工程学报, 2021, 54(11): 57-70, 78.
LIU Y, XIANG S T, WANG D. Real-time evaluation and prediction of spatial temperature field and temperature effect of steel-concrete composite bridge deck system based on BP-LSTM hybrid model [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 57-70, 78. (in Chinese)

(编辑 胡玲)