

基于LSTM神经网络的机载光纤陀螺温度冲击误差补偿技术



何昆鹏¹, 赵瑾玥¹, 周琪², 蒋昱飞¹, 任永甲³, 涂勇强⁴

1. 南开大学, 天津 300350

2. 航空工业西安飞行自动控制研究所 飞行器控制一体化技术重点实验室, 陕西 西安 710065

3. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001

4. 集美大学, 福建 厦门 361021

摘要: 环境温度冲击会降低机载光纤陀螺的性能, 从而影响飞行器导航和姿态控制精度。在光纤陀螺误差机理研究基础上, 本文提出一种基于长短期记忆(LSTM)神经网络的光纤陀螺温度误差补偿模型。该模型通过LSTM网络对光纤陀螺的零偏和标度因数进行实时预测和校正, 提高光纤陀螺的测量精度。试验结果表明, 在温度冲击下, LSTM预测模型补偿后的标度因数误差小于30ppm, 零偏稳定性比常规的线性拟合补偿模型提高0.0034($^{\circ}$)/h。这意味着输出更准确地反映实际角速度值, 陀螺仪的零偏漂移更小, 输出更接近于零值。动态试验中转台输入为20($^{\circ}$)/s时, LSTM补偿后陀螺输出稳定在19.999~20.001($^{\circ}$)/s区间内, 相较于陀螺原始输出误差降低0.008($^{\circ}$)/s。通过LSTM预测模型补偿, 能够在环境变化、外部扰动或传感器故障时, 通过陀螺仪提供更可靠的数据支持, 维持飞行器的稳定性和安全性。

关键词: 光纤陀螺仪; 温度冲击; 零偏; 标度因数; LSTM神经网络

中图分类号: V249.32

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.02.004

光纤陀螺仪(FOG)是一种基于Sagnac效应的角速度测量光纤传感器。其由于具有精度高、结构设计灵活、体积小和快速响应的特性^[1], 广泛应用于航空航天领域的惯性导航系统中。随着航空技术的发展, 高精度光纤陀螺研究及测试^[2]成为研究热点。作为传感器, 陀螺仪能够提供准确的方位、水平、位置、速度和加速度等信号, 以便飞行器或用自动导航仪控制航行体按规定航线飞行^[3]。同时, FOG能够提供精确的姿态、加速度和角速度, 以支持飞行器的准确导航和控制, 可与其他传感器相结合提高航空器姿态控制精度^[4]。在导弹或运载器等航行体制导中, 可直接利用陀螺仪信号完成航行体的姿态控制和轨道控制。其在航空领域涵盖了飞行器振动监测、空中遥感和地球监测等, 通过光纤传感器为飞行提供精确监测数据, 用于健康监测和故障诊断^[5]。此外, 机载光纤陀螺具有稳定平台的作用, 主要用于保持光轴或视轴在惯性空间中的稳定^[6]。然而, 光纤陀螺

仪核心部件对于温度的变化十分敏感^[7-8], 温度变化会导致光纤陀螺的零偏与标度因数发生改变, 进而影响光纤陀螺仪的角速度测量精度。一般的无人机装备光纤陀螺惯导系统时, 无保温装置, 因此随飞行器高度变化, 温度快速变化(如从地面的50 $^{\circ}$ C降到空中的-50 $^{\circ}$ C), 引起光纤折射率变化导致非互异性改变, 影响机载光纤陀螺仪的导航和控制能力^[9]。因此, 尝试用建模预测的软方式, 对陀螺仪进行温度补偿, 以提高陀螺输出角速度的稳定性, 稳定飞行器航行姿态控制。

目前, 对机载光纤陀螺温度进行补偿的方法主要分为基于底层硬件的方法与基于软件层面的方法, 包括温度传感器补偿法、线性化补偿法以及稳态补偿法等。其中, 稳态补偿法是基于对光纤陀螺的稳态工作条件进行补偿, 通过在光纤陀螺制造过程中采用特定绕法来减小温度变化对陀螺性能的影响。其中, 8级和16级对称绕法能够进一步抑

收稿日期: 2023-08-07; 退修日期: 2023-12-01; 录用日期: 2024-01-08

基金项目: 航空科学基金(201658P6007)

引用格式: He Kunpeng, Zhao Jinyue, Zhou Qi, et al. Temperature shock error compensation technology for airborne fiber optic gyroscopes based on LSTM neural networks[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(02): 31-38. 何昆鹏, 赵瑾玥, 周琪, 等. 基于LSTM神经网络的光纤陀螺温度冲击误差补偿技术[J]. 航空科学技术, 2024, 35(02): 31-38.

制光纤陀螺温度误差,但残余温度误差无法完全消除^[10]。而温度传感器补偿需要设计复杂的硬件电路来减少误差,消除温度漂移。若环境温度短时间内发生变化,硬件参数不能及时完成补偿校正,导致传感器输出精度得不到保障^[11]。因此,对光纤陀螺温度特性进行试验研究,建立温度漂移模型并实施温度补偿^[12],软件层面的补偿算法具有更高的可实现性。

光纤陀螺零偏的非线性特征显著,不能简单地用线性模型来表征。传统的利用最小二乘法拟合一阶曲线的方法^[13]误差较大,不能解决温度补偿中的非线性问题,并且多项式拟合模型的参数为固定值,不能解决模型中的参数与温度的耦合问题^[14],即随着温度的变化,补偿模型参数也应当改变。

为解决拟合模型的非线性特征问题与参数温度耦合问题,一系列基于神经网络的温度补偿方法^[15-16]被提出。Shi Yongsheng 等^[17]利用向基函数(RBF)神经网络构建了温度补偿模型,以光纤陀螺的运行时间为输入、温度误差为输出,避免了局部极小问题。但此方案只能在某些情况下使用,补偿精度和重复性也受到限制。此外,也可利用光纤环路作为模型的输入、FOG 输出作为其输出来训练温度基于 RBF 神经网络的补偿模型^[18]。但输入少会导致 RBF 神经网络结构优化不足且其不能对非线性模型进行近似描述,造成一些不确定性。

为避免局部极小值,并得到高精度输出温度补偿模型,本文采用长短期记忆(LSTM)神经网络作为温度补偿模型,进一步强化了时序特征的分析能力,能够对预测误差进行补偿修正^[19]。且时序控制是目前运载系统的重要组成部分,其误差会对测量精度产生决定性影响。LSTM 网络具有一定的记忆功能,即神经网络输出值不仅与当前时刻的输入有关,而且与上一时刻的输出及单元状态有关,其广泛应用于数据预测、故障诊断等领域^[20],保证模型具有较好的补偿精度和通用性。

1 机载光纤陀螺模型分析

温度和温度梯度对光纤陀螺的零点漂移和标度因数有影响。温度引起的输出误差主要表现为 Shupe 误差,即光纤折射率发生变化导致光波相位延迟存在差异^[21],其与光纤环的温度梯度成正比^[22]。另外,还有由应力引起的偏置误差。但这两种误差随温度的变化而不同。当温度或温度梯度稳定时,偏置误差不为零;当温度梯度趋于零时,Shupe 误差为零。为最小化温度和温度梯度对光纤陀螺的影响,

解决光纤陀螺仪核心传感器的温度问题,需要对光纤环在非理想条件下的误差进行补偿。温度补偿涉及测量光纤陀螺及其组件的温度,并利用这些信息来纠正由温度引起的输出信号延迟特性^[23]。目前,常用的机载光纤陀螺温度误差原理如图 1^[1]所示。

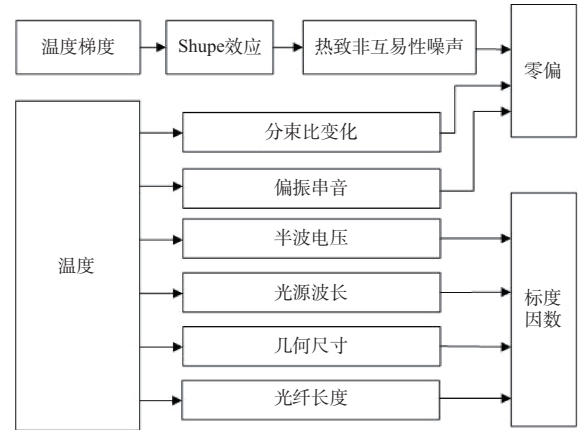


图1 光纤陀螺温度误差机理

Fig.1 FOG temperature error mechanism

目前,FOG 主要采用式(1)中的多项式模型,为简化计算,通常保留到一阶

$$\hat{G} = B + KG \quad (1)$$

式中, $\hat{G}$ 为光纤陀螺的输出; G 为当前状态的实际角速度; B 为式中的零阶项,表示 FOG 的零偏; K 为公式的一阶项,表示 FOG 的标度因数。

本文以零偏和标度因数作为神经网络的输出对象。标度因数和零偏可分别定义为式(2)和式(3)

$$K = K_0 - K_e \quad (2)$$

$$B = B_0 - B_e \quad (3)$$

式中, K_0 为陀螺仪的常温标度因数; K_e 为标度因数误差; B_0 为陀螺仪的常温零偏; B_e 为零偏误差。

根据式(1)~式(3),补偿后的 FOG 输出可改写为

$$G = \frac{\hat{G} - (B_0 - B_e)}{K_0 - K_e} \quad (4)$$

2 LSTM神经网络设计

LSTM 神经网络是经典循环神经网络(RNN)的一种,在 RNN 的基础上引入了记忆单元(memory cell)和门控单元(gate unit)等结构,能够更好地捕捉到序列中的长期依赖关系,可更好地处理时序信息^[24]。通过对历史数据的学习和预测,LSTM 网络能够适应光纤陀螺在不同环境下的输出特性,从而对其零偏误差和标度因数进行实时校正。相

较于传统的RNN,LSTM神经网络还能够避免梯度消失和梯度爆炸等问题^[25],处理长期序列变化数据。每个LSTM单元包含4个网络层,分别为一个记忆单元和三个门结构,结构如图2所示。其中,记忆单元可连接上一步的状态,输入门决定了记忆单元能否记忆新信息^[26],输出门用于调节新信息流量,遗忘门用于保留部分上一时刻的单元状态到当前时刻,确定需要丢弃的信息^[22]。

在遗忘门中,遗忘信息的权重由 f_t 计算得到, f_t 需要利用 h_{t-1} 和 x_t 的信息,计算公式如下

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (5)$$

式中, σ 为sigmoid函数; h_{t-1} 为隐藏层上一时刻输出; x_t 为网络当前输入; W_f 为遗忘门权重系数; b_f 为遗忘门的偏置。其中,Sigmoid函数的公式为

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6)$$

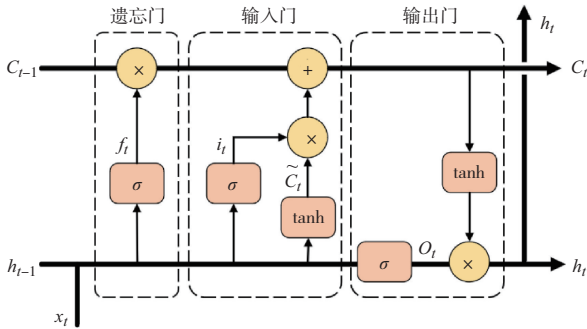


图2 LSTM网络单元结构

Fig.2 LSTM network cell structure

输入门中信息的权重由 i_t 计算得到, $\tilde{C}_t$ 代表需要记忆的信息,计算公式如下

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (7)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (8)$$

式中, W_i 为输入门权重系数; b_i 为输入门偏置; W_c 为信息权重系数; b_c 为信息偏置。 $\tanh$ 函数的表达式为

$$\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (9)$$

根据式(5)~式(9),可以计算出目前网络的状态 C_t

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (10)$$

输出门需要利用目前网络的状态 C_t

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (11)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \oplus h_{t-1} \quad (12)$$

式中, W_o 为输入门的权重系数; b_o 为输入门的偏置。

网络参数设计为单层,8个隐藏单元,输入维度为二维,分别为温度与温度变化率,输出为光纤陀螺零偏以及标度因数。由于零偏和标度因数的数量级不同,采用了分开预测的方法。网络的一部分预测零偏,另一部分预测标度因数,最后结合两个网络输出结果,优化器选择Adam优化器,并选取MSE损失作为训练时的损失函数

$$\text{loss}(\hat{y}, y) = \frac{1}{n} \sum (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (13)$$

式中, $\hat{y}$ 为预测数据; y 为训练集数据;预测集和训练集为不同温度值进行测量的光纤陀螺输出值; n 为训练集的大小。设置优化器学习率为0.01,训练次数为1000次,期望误差值为0.0002ppm,对LSTM神经网络模型进行训练。得到loss曲线图如图3所示。在迭代过程中,损失函数值随着训练次数的增加而逐渐减小,这说明模型正在不断优化。迭代过程中出现略微波动和过拟合现象。而在100次后,函数值降低并达到稳定,保证了模型的预测准确性。

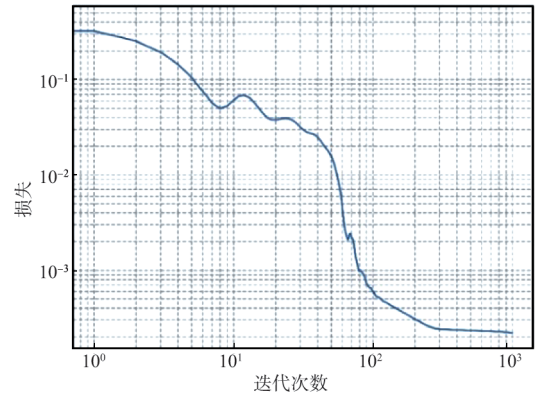


图3 损失函数曲线

Fig.3 Loss curve of the network

3 试验设计

3.1 温度冲击试验设计

3.1.1 静态试验设计

为适应不同的环境温度条件,需要采用温度冲击试验考核环境对光纤陀螺的影响。按照GJB 2426A—2004标准,光纤陀螺仪温度试验的温度变化率小于1°C/min,在低温冲击试验中,将温度变化率提高到3°C/min,以此来模拟温度冲击过程。温箱温度设置如图4所示,其低温设置为-40°C,高温设置为60°C,利用温度传感器记录温箱内部的温度变化情况。将陀螺放入温箱,使得光纤陀螺x轴指向天向,等待温箱温度与陀螺温度一致,然后开始温度冲击静态试验。

3.1.2 动态试验设计

与静态试验类似,光纤陀螺放置方向为 x 轴指向天向,同时温箱温度设置如图4所示。试验过程将恒温、降温、低温恒温停留、升温、高温恒温停留、高温恒温作为一个循环。温度冲击控制试验箱在 $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$,以规定温度转换时间快速温度变换。设置单轴速率转台正转,转台转速稳定后保存光纤陀螺仪输出数据,停转后再设置转台反转,稳定后保存光纤陀螺仪输出数据。转台角速度设置为 $20(^{\circ})/\text{s}$,并且等待陀螺与温箱温度达到室温,开启温度冲击试验。在动态试验中,分别测试了转台角速度为 $20(^{\circ})/\text{s}$ 和 $-20(^{\circ})/\text{s}$ 的情况。

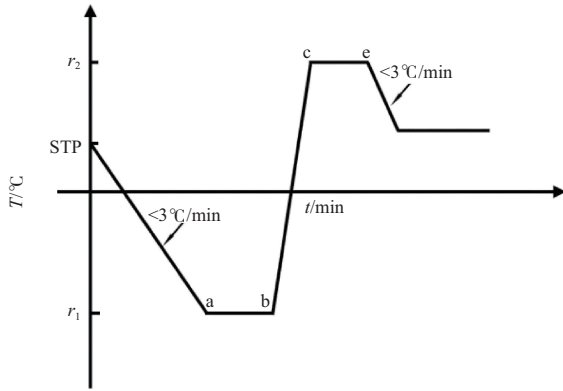


图4 温箱温度设置

Fig.4 Test temperature control

3.2 试验结果

3.2.1 试验数据分析

首先,对光纤陀螺温度数据进行处理,温度变化率的计算如式(14)所示,计算温度变化率如图5所示。在试验过程中,温度变化率随着时间的变化呈现出明显的波动性,且整体呈一个先升高后下降的趋势。表面在温度变化过程中,需要根据实际应用情况对其进行相应的修正。

$$\dot{T} = \frac{T(t) - T(t - 20)}{20} \quad (14)$$

式中, $\dot{T}$ 为温度变化率,即单位时间内的温度变化量; $T(t)$ 表示时间 t 时刻的温度值; $T(t) - T(t - 20)$ 表示时间间隔为20的温度变化值。温度传感器型号为DS18B20,精度是 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,分辨率为 0.0625°C ,数字式采样频率为1Hz。

此外,为减小光纤陀螺输出信号的数据波动,采用均值滤波方法对陀螺仪输出数据进行处理。设置滑动窗口为100s,对输出信号进行滤波平均。输出结果如图6所示,经过均值滤波处理后,有效去除了信号中的高频噪声,同时保留低频成分的信息,从而减小光纤陀螺输出信号的数据波

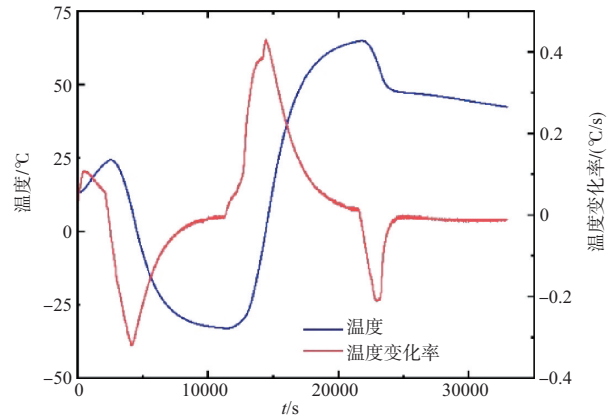


图5 温度与温度梯度

Fig.5 Temperature and temperature gradient

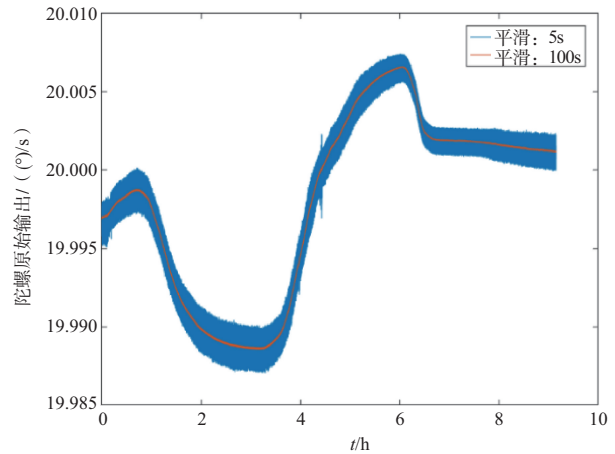


图6 5s与100s均值滤波对比

Fig.6 Comparison of 5s and 100s smooth filtering

动,提高其稳定性和精度。同时可以发现,输出信号的特征与温度数据相关,光纤陀螺的输出信号与温度变化率之间存在一定的线性关系,这也说明了光纤陀螺的温度响应具有一定的惯性和滞后性。

在静态试验中,将光纤陀螺放置在不同温度下,获取其输出信号和温度信息。将温度和温度变化率作为输入,将光纤陀螺零偏和标度因数作为输出,训练LSTM网络,具体结果如图7所示。将实际值减去预测值,即可得到此时陀螺仪的无偏输出,预测平均误差为 2.8622×10^{-5} 。可以看出,LSTM网络预测结果与实际值基本一致,这说明LSTM网络可以有效地对光纤陀螺的零偏进行预测和校准,提高其精度和稳定性。

在动态工作状态下,光纤陀螺会受到更多的干扰和噪声,对LSTM网络的预测精度产生一定影响。图8展示了动态试验中对于标度因数的预测结果。预测出的标度因数

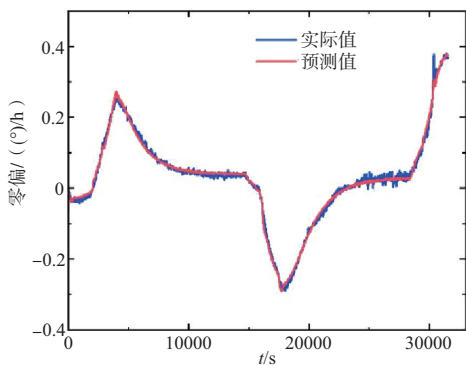


图7 零偏预测结果
Fig.7 Bias compensation value

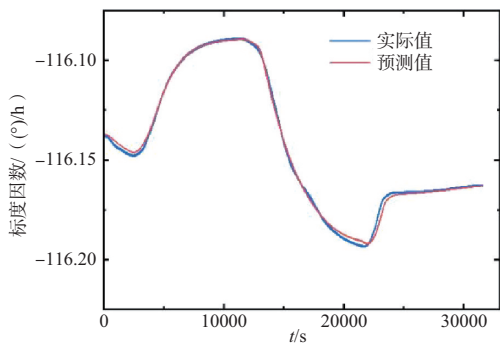


图8 标度因数预测
Fig.8 Scale factor compensation value

值与实际值基本符合,其平均误差为 1.0203×10^{-6} 。这表明在陀螺仪工作情况下,LSTM网络仍能维持稳定的输出,具有较高的精度和可靠性。

3.2.2 温度补偿结果分析

本文采用LTSM温度补偿方法,通过对温度变化率和光纤陀螺输出信号的关系进行建模,得到了温度补偿系数,并将其应用于机载光纤陀螺输出信号的处理中。

传统线性补偿模型和经过LSTM补偿后的零偏稳定性见表1。由表1可以看出,30000s时,补偿前的零偏为 $0.13861(^{\circ})/h$,经过补偿处理后,数值降至 $0.01246(^{\circ})/h$ 。在动态试验中,按照光纤陀螺仪标度因数非线性度计算公式,计算光纤陀螺标度因数非线性度 K_n 为 $2.672712ppm$ 。按照光纤陀螺仪标度因数不对称性计算公式,标度因数不对称性 K_a 为 $1.484695ppm$,满足光纤陀螺仪刻度系数稳定性要求。

如图9所示,在转台输入角速度为 $20(^{\circ})/s$ 的情况下,光纤陀螺原始输出幅值在 $20.009(^{\circ})/s$ 左右,在温度变化剧烈的情况下表现不佳,输出波动较大,无法满足实际应用的需求。经LSTM网络补偿后输出稳定在 $19.999\sim20.001(^{\circ})/s$ 区间内,与转台转速一致,各温度阶段光纤陀螺输出误差均小

表1 静态试验零偏稳定性
Table 1 Static test bias stability

补偿方法	零偏稳定性/ $((^{\circ})/h)$
原始数据	0.13861
线性拟合	0.01588
LSTM神经网络拟合	0.01246

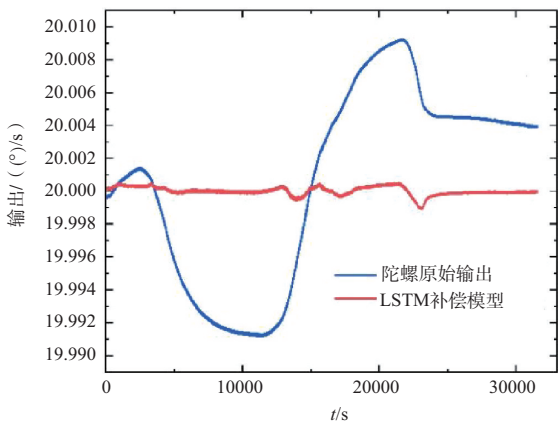


图9 FOG 动态试验结果
Fig.9 Output angular velocity of FOG

于原始输出,虽在温度剧烈变化处仍有小幅波动,但这仍能够体现出补偿效果的优越性,证明了本模型的有效性。

3.2.3 温度补偿模型验证

将光纤陀螺温度补偿模型试验步骤重复多次进行试验。试验过程中保存光纤陀螺仪原始数据,温度补偿模型补偿后的角速度数据、光纤环温度值、光纤环外温度值,利用线性模型对原始数据进行拟合、补偿。补偿前的结果与温度补偿模型补偿后的输出对比如图10所示。

基于LSTM神经网络模型的温度补偿算法补偿后陀螺输出的零偏稳定性小于利用线性拟合的温度补偿模型补偿

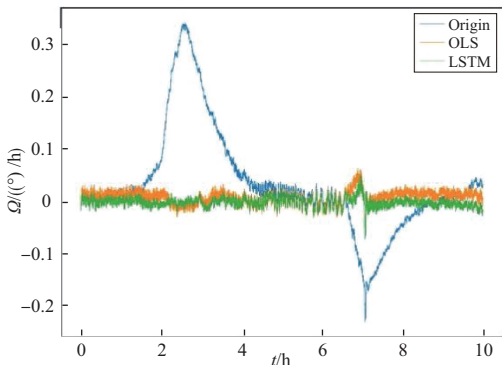


图10 补偿前后输出对比
Fig.10 Comparison of output before and after compensation

后陀螺输出的零偏稳定性,与原始输出的零偏稳定性相差一个数量级。因此,基于LSTM神经网络的温度补偿模型可以有效抑制光纤陀螺仪的温度漂移误差,提高了光纤陀螺仪的温度性能。

4 结束语

本文以机载光纤陀螺在温度冲击时测量误差大为研究背景,在分析光纤陀螺的误差机理基础上,设计了机载光纤陀螺仪温度冲击误差补偿模型。通过研究,得到以下结论:

(1)本文讨论了机载光纤陀螺误差产生的机理,确定了温度是导致光纤陀螺输出误差增大的主要因素,随着温度变化,光纤陀螺中的光纤长度、折射率等也会发生变化,从而导致光路差、光程差等测量误差的增加。

(2)利用LSTM网络预测零偏与标度因数平均误差分别为 2.8622×10^{-5} 和 1.0203×10^{-6} ,预测结果与实际值基本一致,能够更好地捕捉机载光纤陀螺输出数据的长期依赖关系,提高模型的准确性和稳定性,使补偿更加全面有效。

(3)本文进行了一系列静态以及动态试验,确定了光纤陀螺零偏、标度因数与温度参数的影响。对比了线性模型与LSTM补偿后的效果,在动态试验中转台输入为 $20(^{\circ})/s$ 时光纤陀螺的输出稳定在 $19.999 \sim 20.001(^{\circ})/s$ 区间内,且LSTM补偿后零偏稳定性比线性拟合的模型低 $0.00342(^{\circ})/h$,与原始输出的零偏稳定性相差一个数量级,且标度因数满足机载光纤陀螺仪稳定性要求。

AST

参考文献

- [1] 顾春雷,陆金桂,王怡祖,等. 基于GA-BP神经网络的光纤陀螺温度补偿[J]. 仪表技术与传感器, 2018(3): 113-116.
Gu Chunlei, Lu Jingui, Wang Yizu, et al. Temperature compensation of FOG based on GA-BP neural network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(3): 113-116.(in Chinese)
- [2] Wang Tingjun, Gao Yanbin, Ma Tao. Research on angular acceleration error compensation technology for FOG SINS[C]. ICICEE, 2012: 1239-1242.
- [3] 余驰. 基于陀螺稳定的机载光电转塔系统建模与仿真[J]. 激光与红外, 2017, 47(11): 1392-1398.
Yu Chi. Modeling and simulation of airborne optical-electronic turret system based on gyro stabilization[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(11): 1392-1398. (in Chinese)
- [4] 陈勇,张新慧,耿延升,等. 飞机飞控系统指令异构力传感器技术研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(4): 55-60.
- Chen Yong, Zhang Xinhui, Geng Yansheng, et al. Research on command heterogeneous force sensor technology for aircraft flight control system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(4): 55-60. (in Chinese)
- [5] 丛爽,邓科,尚伟伟,等. 陀螺稳定平台建模分析[J]. 科技导报, 2011, 29(9): 42-47.
Cong Shuang, Deng Ke, Shang Weiwei, et al. Modeling analysis on the gyro stabilized[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(9): 42-47. (in Chinese)
- [6] 王文娟,薛景锋,张梦杰,等. 基于光纤传感的结构变形实时监测技术研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12): 97-104.
Wang Wenjuan, Xue Jingfeng, Zhang Mengjie, et al. Research on real-time monitoring technology of structural deformation based on optical fiber sensing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 97-104.(in Chinese)
- [7] Liu Yuanyuan, Yang Gongliu, Yin Hongliang. Temperature drift modeling and compensation of FOG combined extended forgetting factor recursive least square(EFRLS)[C]. 34th Chinese Control Conference, 2015: 1652-1657.
- [8] 刘元元,杨功流,李思宜. BP-Bagging模型在光纤陀螺温度补偿中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(2): 254-259.
Liu Yuanyuan, Yang Gongliu, Li Siyi. Application of BP-Bagging model in temperature compensation of fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(2): 254-259. (in Chinese)
- [9] 刘贺,李淮江. 基于BP神经网络的压力传感器温度补偿方法研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(5): 688-692.
Liu He, Li Huaijiang. Research on temperature compensation method of pressure sensor based on BP neural network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(5): 688-692. (in Chinese)
- [10] 范运强,黄继勋,李晶. 基于局部光路温度控制的光纤陀螺温度误差抑制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(6): 809-813.
Fan Yunqiang, Huang Jixun, Li Jing. Fiber optic gyroscope temperature error suppression method with local optical path temperature control[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(6): 809-813. (in Chinese)
- [11] 李玉军,王琛琛,焦尚彬,等. 基于SCA-LSSVM的电涡流传感器温度补偿方法研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(1):

- 57-62.
- Li Yujun, Wang Chenchen, Jiao Shangbin, et al. Research on temperature compensation method of eddy current sensor based on SCA-LSSVM[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(1): 57-62. (in Chinese)
- [12] 赵建辉, 徐帆, 李帆, 等. 随钻测斜仪中光纤陀螺光纤环Shupe效应仿真[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 67-73.
- Zhao Jianhui, Xu Fan, Li Fan, et al. Simulation of shupe effect in fiber optic gyroscope fiber coil with inclinometer while drilling[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 67-73. (in Chinese)
- [13] 刘书桂, 董英华, 姜珍珠. 光笔式视觉测量系统中的测头中心自标定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1727-1733.
- Liu Shugui, Dong Yinghua, Jiang Zhenzhu. Self-calibration of probe tip center for 3D vision coordinate measuring system in portable light pen[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(7): 1727-1733. (in Chinese)
- [14] Zhao Dunhui, Chen Jiabin, Han Yongqiang, et al. Temperature compensation of FOG scale factor based on CPSO-BPNN[C]. IEEE Industrial Electronics(IE) Chapter, 2010: 2899-2902.
- [15] Mao Ning, Xu Jiangning, Li Jiangshu, et al. A LSTM-RNN-based fiber optic gyroscope drift compensation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(32):1-10.
- [16] Zhao Shuai, Zhou Yilan, Shu Xiaowu. Study on nonlinear error calibration of fiber optical gyroscope scale factor based on LSTM[J]. Measurement, 2022, 190: 110-116.
- [17] Shi Yongsheng, Shen Jun, Gao Weixi. Startup compensation for fiber optic gyro based on RBF neural networks[C]. The 2nd International Conference on Information Science and Engineering, 2010: 4696-4699.
- [18] Yang Guolinag, Xu Yefeng, Xu Haigang. Temperature compensation for FOG based on RBF neural networks[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2010, 32(3): 361-363.
- [19] Koller O, Camgoz N C, Ney H, et al. Weakly supervised learning with multi-stream CNN-LSTM-HMMs to discover sequential parallelism in sign language videos[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019, 42(9): 2306-2320.
- [20] 崔晋晋, 王雪. 基于长短时记忆太阳能无线传感节点能量预测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 147-154.
- Cui Sujin, Wang Xue. Solar wireless sensor node energy prediction based on long-short term memory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 147-154. (in Chinese)
- [21] 范运强, 黄继勋, 李晶. 基于等效不对称长度的光纤环温度性能评价方法[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 39-45.
- Fan Yunqiang, Huang Jixun, Li Jing. Temperature performance evaluation of fiber coil with equivalent asymmetric length [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 39-45. (in Chinese)
- [22] 黄春福, 李安, 覃方君, 等. 基于 PSO-SVR 的光纤陀螺温度误差建模与实时补偿[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 95-102.
- Huang Chunfu, Li An, Qin Fangjun, et al. Temperature error modeling and real-time compensation of fiber optic gyroscope based on PSO-SVR[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 95-102. (in Chinese)
- [23] 闫晗, 杨远洪, 杨福铃. 光纤陀螺环热扩散延迟响应模型及补偿技术研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 255-261.
- Yan Han, Yang Hongyuan, Yang Fuling. Response model and compensation technology of thermal diffusion delay in fiber optic gyro coil[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 255-261. (in Chinese)
- [24] 张璐, 冯东明, 吴刚. 基于 LSTM 网络的车辆动态荷载识别方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(2): 187-192.
- Zhang Lu, Feng Dongming, Wu Gang. Dynamic vehicle load identification method based on LSTM network[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(2): 187-192. (in Chinese)
- [25] 石怀涛, 尚亚俊, 白晓天. 基于贝叶斯优化的 SWDAE-LSTM 滚动轴承早期故障预测方法研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(18): 286-297.
- Shi Huaitao, Shang Yajun, Bai Xiaotian. Early fault prediction method combining SWDAE and LSTM for rolling bearings based on Bayesian optimization[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(18): 286-297. (in Chinese)
- [26] 陈保家, 陈学力, 沈保明, 等. CNN-LSTM 深度神经网络在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(6): 28-36.
- Chen Baojia, Chen Xueli, Shen Baoming, et al. An application of convolution neural network and long short-term memory in rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 28-36. (in Chinese)

Temperature Shock Error Compensation Technology for Airborne Fiber Optic Gyroscopes Based on LSTM Neural Networks

He Kunpeng¹, Zhao Jinyue¹, Zhou Qi², Jiang Yufei¹, Ren Yongjia³, Tu Yongqiang⁴

1. Nankai University, Tianjin 300350, China

2. Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

3. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

4. Jimei University, Xiamen 361021, China

Abstract: The measurement accuracy of the onboard fiber optic gyroscopes could be reduced by environmental temperature shocks, consequently impacting the flight accuracy of the aircraft. A temperature error compensation model based on long short-term memory (LSTM) neural networks was proposed in this paper to improve the measurement accuracy of fiber optic gyroscopes under temperature shock. The zero bias and scale factor of the fiber optic gyroscope were predicted and corrected in real-time using the LSTM network, improving its measurement accuracy. Experimental results showed that under temperature shock, the scale factor error was compensated by the LSTM prediction model, which was less than 30ppm. The zero bias stability was improved by 0.0034(°)/h compared with the conventional linear fitting compensation model. In dynamic experiments, when the input of the turntable was set to 20°/s, the gyroscope output was stabilized in the range of 19.999~20.001(°)/s after LSTM compensation, and the error of the gyroscope original output was reduced by 0.008(°)/s. The changes of the zero bias and scale factor of the airborne fiber optic gyroscope under temperature shock were more effectively compensated by the LSTM network. The stability of the inertial navigation of aircraft was enhanced.

Key Words: fiber optic gyroscope; temperature compensation; zero bias; scale factor; LSTM neural networks

Received: 2023-08-07; **Revised:** 2023-12-01; **Accepted:** 2024-01-08

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (201658P6007)