

# 函数型神经网络在捷联陀螺非线性估计中的应用\*\*

陈熙源

程启明

(东南大学仪器科学与工程系, 江苏 南京 210096 盐城工学院计算机系, 江苏 盐城 224003)

**摘 要** 针对神经网络的强自学习性、自适应能力及非线性变换特性, 结合陀螺静态漂移误差模型, 采用函数型神经网络对捷联陀螺静态漂移误差系数进行了非线性估计, 解决了捷联陀螺重复启动时的静态漂移误差系数的在线动态标定问题。

**关键词** 捷联陀螺; 神经网络; 非线性估计; 误差模型

**分类号** U666.123 **文献标识码** A **文章编号** 1008-5092(2000)01-0008-03

陀螺仪是惯性导航系统的核心元件, 惯性导航系统的主要误差是陀螺漂移, 提高陀螺精度是改善惯性导航系统性能的关键。目前捷联挠性陀螺由于工艺上的困难, 在机械方面提高陀螺精度成本越来越高。因此为提高惯性系统的精度在软件上对捷联陀螺漂移误差的在线动态建模及补偿具有现实意义。

捷联挠性陀螺由于其物理等方面原因造成其传感器特性随温度、环境等外界条件变化较大, 每次启动时传感器静态漂移误差随机性较强, 若把该陀螺某次标定的误差系数补偿到系统中将极大影响捷联惯性系统的精度, 从而探索陀螺静态漂移在线动态标定的方法极为必要。

人工神经网络是受生物大脑的启发, 用大量简单的处理单元广泛联结构成的一类信息处理系统。近年来, 对神经网络的研究重新崛起, 已成为高科技研究领域中的一门令人瞩目的新兴学科。现有的神经网络模型已近百种, 目前应用最多的是多层感知器(BP)网络、Hopfield 神经网络、自组织神经网络和概率神经网络 4 种。其中, 多层感知器是一种典型的前馈神经网络, 它通常由输入层、输出层和若干隐层组成。一个简单的 3 层 BP 网络, 在一定条件下可以逼近任一非线性函数<sup>[1]</sup>。但其存在速度慢、物理意义不明确等不足。Giles 等<sup>[2]</sup>及 Pao<sup>[3]</sup>的研究表明, 在网络中引入“高阶”项, 构成函数型神经网络, 不仅可提高网络的学习速度, 而且可简化网络的结构和学习规则。本文应用函数型神经网络理论, 针对捷联挠性陀螺静态漂移误差模型的特点, 对陀螺漂移误差在线动态标定作了探索性研究。

## 1 神经网络建模

很多自适应非线性判别函数可由非线性输入的单层函数型连接神经网络实现。它在一个函数型连接网络中, 函数型连接的作用是将输入模式每个分量乘以整个模式向量, 其结果是产生一个原始模式向量的张量, 即外积。图 1 给出了函数型连接的示意图, 图中表明, 在这个基于数学的适用于并行分布处理的网络概念化模型中, 一旦一个节点  $k$  被激励, 就会有許多附加函数功能也被激励, 即不仅能得到  $o_k$ , 而且还能得到  $f_0(o_k)$ 、 $f_1(o_k)$ 、 $\dots$ 、 $f_n(o_k)$ , 原则上, 只要使用函数型连接方法, 总可用单层网络实现监督学习<sup>[4]</sup>。

考虑  $I$  个输入模式  $\{x_i\}$ , 每个输入应用到传感器产生一个输出模式  $\{y_i\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, i-1$ 。同时每个模式可扩展到  $N$  个分量, 连接权系数用  $W$  表示输入输出间的关系可表示成矩阵形式

$$XW = Y \quad (1)$$

\* 收稿日期: 1999-09-06

\*\* 中国船舶总公司科研基金资助项目(编号 97J40.5.2)

第一作者简介: 陈熙源(1968-), 男, 安徽省铜陵市人, 博士研究生, 东南大学仪器科学与工程系讲师。

如果  $I = N$ , 并且  $X$  的行列式不为 0, 即  $|X| \neq 0$ , 则

$$W = X^{-1} Y \quad (2)$$

如果  $I < N$ , 则可将  $X$  进行矩阵分块, 得出一个分块矩阵  $X_F$ , 其维数为  $I \times 1$ , 若  $|X_F| \neq 0$ , 令  $W_i = W_{i+1} = \dots = W_{N-1} = 0$ , 则  $W = X_F^{-1} Y$  (3)

如果  $I > N$ , 可用常规伪逆技术求解:  $W = (X^T X)^{-1} X^T Y$  (4)

从而可表明, 函数型扩展技术其权值总是可解的, 即函数型展开模型总能使问题由单层网络解决, 这个求解过程可由下述自适应监督学习算法完成。

### 2 函数型连接神经网络的学习算法

对应每一个实际输入  $x_i$ , 可得到一个非线性数据集  $\{f_n(x_i)\}, n = 0, 1, \dots, n - 1$ , 这些可用于函数型连接网络的输入, 参考图 2。

函数型连接神经网络的学习算法可由下式表示:

$$y_i^{est}(k) = \sum f_n(x_i) w_n(k) \quad (5)$$

$$e_i(k) = y_i(k) - y_i^{est}(k) \quad (6)$$

权值调整:

$$w_n(k + 1) = w_n(k) + \alpha e_i(k) f_n(x_i) \quad (7)$$

其中,  $y_i(k)$ 、 $y_i^{est}(k)$ 、 $e_i(k)$  及  $w_n(k)$  分别为第  $i$  个输入的期望输出、估计输出、误差及函数型网络在第  $k$  步的第  $n$  个连接权,  $\alpha$  为学习因子,  $\alpha$  影响稳定性和收敛性。

### 3 陀螺漂移误差模型

假设陀螺沿莱查系坐标轴  $ox$ 、 $oy$  的漂移角速度误差分别为  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ , 重力加速度向量在莱查系坐标轴上的投影分量为  $g_x$ 、 $g_y$ 、 $g_z$ , 则通常可将陀螺漂移误差模型表示为

$$\omega_x = d_{x0} + d_{x1} g_x + d_{x2} g_y + d_{x3} g_z + d_{x4} g_x^2 + d_{x5} g_y^2 + d_{x6} g_z^2 + d_{x7} g_x g_y + d_{x8} g_y \cdot g_z + d_{x9} g_x \cdot g_z + \varepsilon_x \quad (8)$$

$$\omega_y = d_{y0} + d_{y1} g_x + d_{y2} g_y + d_{y3} g_z + d_{y4} g_x^2 + d_{y5} g_y^2 + d_{y6} g_z^2 + d_{y7} g_x g_y + d_{y8} g_y \cdot g_z + d_{y9} g_x \cdot g_z + \varepsilon_y \quad (9)$$

模型辨识就是根据试验测得的数据  $\omega_x(i)$ 、 $\omega_y(i)$ 、 $g_x(i)$ 、 $g_y(i)$ 、 $g_z(i)$  来估计诸系数 ( $d_x$ 、 $d_y$ )。在许多情况下, 模型中的有些系数得不到充分激励, 如果变量选择不合适, 系数会出现病态<sup>[4]</sup>。

### 4 捷联陀螺的在线动态标定

由静态漂移误差模型(8)、(9), 得对陀螺任一敏感轴有:

$$y = [w_0, w_1, \dots, w_9] [1 \quad g_x \quad g_y \quad g_z \quad g_x^2 \quad g_y^2 \quad g_z^2 \quad g_x g_y \quad g_y g_z \quad g_x g_z]^T \quad (10)$$

且系数  $w_n (n = 0, 1, 2, \dots, 9)$  随环境条件等变化, 为保证准确性, 传感器的在线标定是必要的。

用前面所述的函数型连接神经网络方法, 实现陀螺的在线标定, 该方法可在环境条件陀螺安装条件等发生变化及随着陀螺的使用, 其自身出现一定老化的情况下, 通过简单的迭代学习, 便可实现陀螺的在线自适应估计。具体做法是对于一组传感器的输入输出数据对  $\{g_x \quad g_y \quad g_z \quad g_x^2 \quad g_y^2 \quad g_z^2 \quad g_x g_y \quad g_y g_z \quad g_x g_z \quad y\}$ , 用(10)式拟合陀螺静态特性, 假设系数  $w_n (n = 0, 1, 2, \dots, 9)$  是常数, 将  $\{g_x \quad g_y \quad g_z \quad g_x^2 \quad g_y^2 \quad g_z^2 \quad g_x g_y \quad g_y g_z \quad g_x g_z \quad y\}$  作为神经网络的输入和输出, 其中将  $\{g_x \quad g_y \quad g_z\}$  作为输入向量  $X$ ,  $y$  为输出向量, 按图 2 所示进行权值训练, 训练算法如(8)式, 权值  $w_n (n = 0, 1, 2, \dots, 9)$  初值可选为  $(-1, 1)$  间的随机数, 在神经网络内部由  $\{g_x \quad g_y \quad g_z \quad g_x^2 \quad g_y^2 \quad g_z^2 \quad g_x g_y \quad g_y g_z \quad g_x g_z\}$  构成的

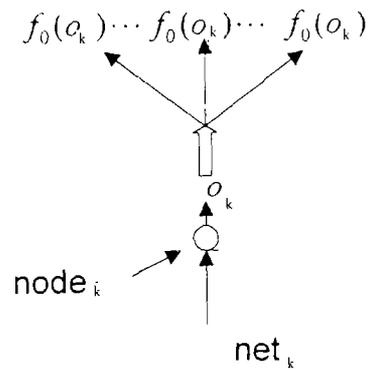


图 1 函数型连接示意图

Fig.1 The sketch figure of the function-type juncture

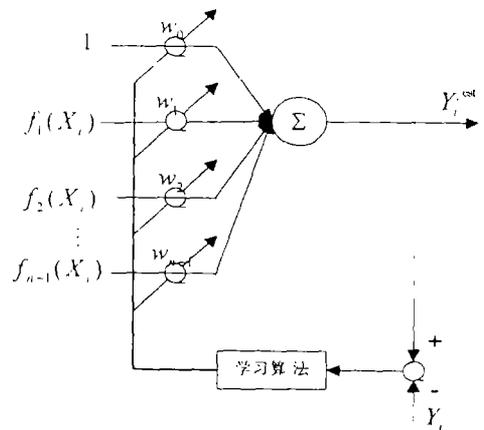


图 2 权值训练示意图

Fig.2 The sketch figure of the right value training

扩展输入集将产生一个输出  $y_i^m$ , 按(6)式所得的真实值与估计值之间的差  $e_i$  用于权值修正。将每个输入输出数据对顺序地加到神经网络, 每次连接权用算法(7)式修正。所有输入输出数据对构成一个学习迭代。学习过程多次进行, 直至均方误差(MSE)达到一个很小的值。此时, 训练完成, 权值即为估计系数。

在陀螺使用过程中, 当其需要标定时, 只要获取一组输入输出数据对, 就可按上述过程重新得到估计系数  $w_n (n = 0, 1, 2, \dots, 9)$ , 这便实现了陀螺的在线动态标定。

### 5 实例研究

从某陀螺得到一组体现其特性的数据及当时的加速度值, 如图 3 所示, 分别按(10)式, 用函数型连接神经网络方法进行学习, 学习前, 对数据进行归一化处理。为保证收敛速度和稳定性, 学习过程中, 学习因子又取为变数, 先大后小, 从 0.95 变到 0.4, 迭代结束得到(10)式中各系数如表 1:

表 1 标定系数  $w_n$   
Table 1 The demarcated coefficients  $w_n$

$\omega_0$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$	$\omega_7$	$\omega_8$	$\omega_9$
8.040	7.352	4.683	-5.26	1.268	0.693	-0.42	0.145	-0.27	0.029

其中,  $\omega_0$  单位为  $(^\circ/h)$ ;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  单位为  $(^\circ/h/g)$ ;  $\omega_4, \omega_5$  单位为  $1/(h \cdot g^{-2})$ ;  $g$  为重力加速度。

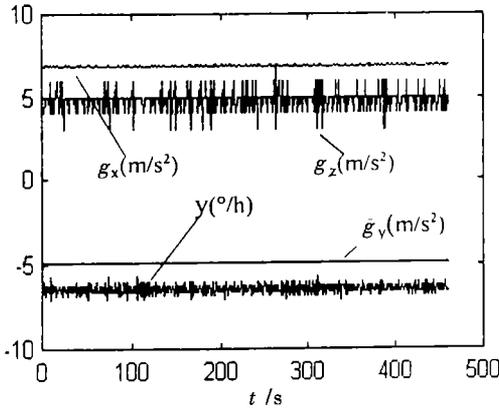


图 3 陀螺某轴静态漂移及加速度信号

Fig. 3 The static drift and acceleration signal of some axis of gyroscope

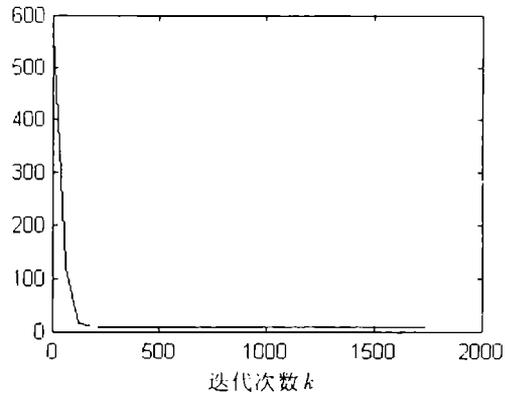


图 4 迭代过程中, 真实值与估计值平方和误差变化图

Fig. 4 The variational figure of square sum error between true value and estimate value in iterative process

为方便实现陀螺的现场标定, 在捷联惯性系统中增加神经网络标定程度。在需标定时, 角速度及加速度采样值构成数据组, 在 PC 机上用此数据组, 利用介绍的神经网络方法即得到新的估计系数  $w_n (n = 0, 1, 2, \dots, 9)$ , 将这些系数传送到系统中, 并进行补偿。

### 6 结束语

本文采用人工神经网络方法解决捷联陀螺非线性估计和动态标定问题, 从实例可见该方法有如下优点: (1) 不需很大的数据存储量, 可很精确地实现陀螺非线性估计; (2) 当使用环境及条件发生变化时, 可方便实现在线动态标定; (3) 估计使标定方法简单, 易于实现, 在输入真实值后, 不须人工参与可自动完成。

#### 参 考 文 献

- 1 B. Widrow, M. H. Lehr[J]. Proc IEEE, 1990, 78(9): 1415 ~ 1442.
- 2 C. L. Giles, T. Maxweel[J]. Applied Optics, 1987, 26: 4972 ~ 4978.
- 3 Y. H. Pao 著. 自适应模式识别与神经网络[M]. 马颂德译. 北京: 科学出版社, 1992.
- 4 田蔚凤. 陀螺漂移模型变量的最优选择[J]. 中国惯性技术学报, 1996(4): 24.

(下转第 52 页)

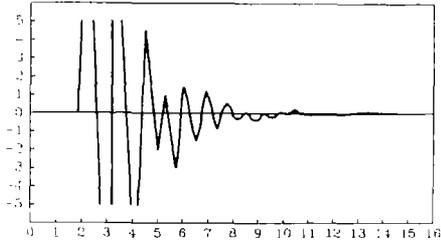


图 2 第二种试桩波形图

Fig.2 The oscillogram of the second type of the test pile

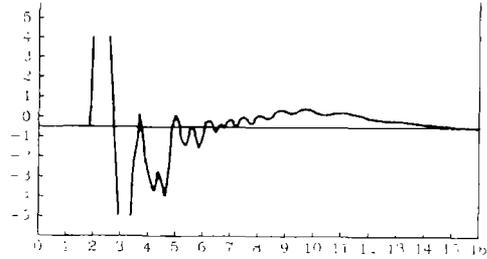


图 3 第三种试桩(不合格)波形图

Fig.3 The oscillogram of the third type of the test pile(off-grade pile)

荷载传递影响不大,对承载力不会造成明显影响,因此这类桩也属于合格桩。第三种试桩,由于桩身出现无灰段,桩体不连续,因此不能可靠传递荷载,应归为不合格桩。

(1)标准贯入试验和现场取芯试验可以有效地检测被测试粉喷桩桩身强度及主要影响因素。

(2)低应变动测试验可以对粉喷桩实施普查,从而对粉喷桩桩身的完整性做出合理评价。

(3)将粉喷桩桩身强度与完整性测试结合起来,从而对粉喷桩桩身质量做出较全面的评价。

### 3 结语

### 参 考 文 献

- 1 叶为民,唐益群,杨林德.水泥土搅拌法复合地基测试方法探讨[J].工程勘察,1998(1):18~20.
- 2 马海龙,费勤发.粉喷桩复合地基的实验研究及设计方法[J].岩土力学,1995,16(3):49~54.
- 3 林时坚,高亚成,王式.反射波法测桩的波形分析[J].河海大学学报,1995,23(4):42~49.

## The experiment research of quality of cement soil powdered jet pile shaft

Li Lanying Wang Zhaoyu Li Fei

(Department of Civil Constrection Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, PRC)

**Abstract** This paper analyses the test method of quality of powdered jet pile shaft in model soft foundation around seaside of north jiangsu and the test results. Pile shaft capacity and main factors are tested by standard penetration test and sit core test. By low train dynamic test pile are widely tested and the integrity of piles shaft are evaluated. Combining pile capacity with integrity test, the paper evaluates thoroughly the quality of pile shaft. Some suggestions are presented for the application of powdered jet pile composite foundation.

**Keywords** cement soil; powdered jet pile; quality test

(上接第 10 页)

## Function-Type Neural Networks Application for Nonlinear Evaluation of Strapdown Gyroscope

Chen Xiyuan<sup>1)</sup> Cheng Qiming<sup>2)</sup>

- (1)Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, PRC
- (2)Department of Computers Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, PRC

**Abstract** As networks with strong self-learning, self-adapting ability and nonlinear change character, this paper makes nonlinear evaluation for strapdown-gyroscope static drift error parameter using function-type nerral networks, solves problem about on-line dynamically calibrating for switch-on to switch-on static drift error parameter of strapdown-switch-on to switch-on static drift error parameter of strapdown-gyroscope.

**Keywords** strapdown gyroscope; neural networks; nonlinear evaluation; error model