

文章编号: 1003-501X(2009)08-0139-04

RBF 网络在编码器误差补偿中的应用

洪 喜^{1,2}, 续志军¹, 杨 宁¹, 佟丽翠^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用径向基函数(RBF)网络进行光电编码器误差补偿, 具有非线性处理特性好、逼近精度高等特点。针对 RBF 网络在工程应用中的特点, 文中首先介绍了 RBF 修正模型与编码器检测转台的结合应用, 在进行编码器误差检测的同时即可完成仿真分析;再进一步根据算法在数字信号处理器(DSP)中的应用,介绍了算法的优化方法。实际工作表明:将建模与检测相结合,效果直观,方法灵活;优化后的补偿算法在满足运算时间的基础上并未对补偿精度带来明显影响,可将系统精度提高 1~3 倍。

关键词: 径向基函数; 光电编码器; 数字信号处理器; 误差补偿

中图分类号: TN762; TP183

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2009.08.026

Application of RBF Networks for Error Compensation in Optical Encoders

HONG Xi^{1,2}, XU Zhi-jun¹, YANG Ning¹, TONG Li-cui^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To improve the precision of the encoder system, a method for error compensation in optical encoder was presented by applying Radial Basis Function (RBF). At first, how to integrate RBF model with error detecting system of encoder was introduced. The simulation analysis can be completed while run error detecting. At the same time, necessary model parameters could be obtained. Then, the parameters were written to DSP to run real error compensation. The optimization for RBF algorithms was introduced to resolve the problems existed in the RBF model, i.e., large amount of data, massive matrix operation and complicated arithmetic, ect. The practical application proves that the simulation effect is direct and clear by combing the model building with error detecting. The test results show that the optimized compensation model meets the requirements of running time without decreasing compensation precision obviously and the precision of system error is improved 1~3 times.

Key words: radial basis function (RBF); optical encoder; digital signal processor (DSP); error compensation

0 引 言

编码器误差具有成因复杂、分布非线性等特点,难以用准备的数学模型描述,传统的补偿方法对其精度的提高是有一定限度的。利用径向基网络进行编码器的误差补偿,只以用来检测的高精度检测仪器的检测值作为期望目标,无需掌握误差的先验知识与分布规律,避免了传统方法所需的大量复杂的分析工作。关于利用 RBF 进行误差补偿的相关理论分析^[1-2],笔者已经在文献[3]中详细介绍过,本文将从实际应用角

收稿日期: 2009-01-09; 收到修改稿日期: 2009-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574089)

作者简介: 洪喜(1980-),女(汉族),吉林长春人。博士研究生,主要研究电子技术应用与光电传感技术。E-mail: hongxi0221@sina.com。

通信作者: 续志军(1953-),男(汉族),吉林长春人。研究员,博士生导师,主要从事光电传感技术和电子技术应用的研究。

E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn。

度出发, 主要介绍如何将该补偿方法与新型编码器检测转台结合应用, 并进一步进行算法优化以满足工程应用的需要。

1 RBF 模型在编码器误差补偿中的应用

1.1 RBF 基本工作原理^[4]

RBF 主要由两部分组成, 如图 1 所示。

第一层也即隐层: 非线性变换层。隐层的输出定义为

$$z_k = \phi(\delta_k) \quad (1)$$

隐层主要采用高斯函数, 即

$$\phi(\delta_k) = e^{-(\delta_k/b)^2} \quad (2)$$

其中: X 为网络输入, 即编码器检测时采样点的角度值; δ_k 为输入模式 X 距离该径向基函数中心向量 C_k 的欧氏范数; b 用来控制作用函数的曲线宽度, 即它决定了基函数围绕中心点的宽度。

第二层也即输出层: 线性合并层。

$$s_j = \sum_{k=1}^p w_{jk} \cdot z_k \quad (3)$$

$$o_j = f(s_j) \quad (4)$$

其中: w_{jk} 是输出结点 j 到隐层的第 k 个结点的权向量, o_j 为网络实际输出。

1.2 RBF 在误差补偿中的建模原理

将 RBF 网络用于编码器误差补偿中的原理简述如下^[5-7]: 将检测数据作为建模样本, 以采样点处的角度值作为网络的输入样本 X , 以高精度的检测仪器的检测值作为网络输出期望值, 根据样本特征不断调节径向基函数的中心 C_k 和宽度并利用实际输出值 o_j 与期望值之间的误差来调节权因子 w_{jk} , 使得建立的网络模型能较好地拟合出整条误差检测曲线(关于隐层与中间输出层的设计思想笔者已在文献中详细介绍过, 这里不再赘述)。这种补偿方法可以看作是对高精度检测基准的逼近。

1.3 RBF 在编码器误差补偿中的应用

将 RBF 应用至编码器误差检测与补偿的工作过程简述如下: 首先将 RBF 模型嵌入至基于 LabVIEW 的检测转台中, 在检测转台上完成算法的仿真分析与建模参数的获取; 然后将建模参数烧写至被检编码器的 DSP 中, 在 DSP 中完成误差补偿运算。

2 结合 RBF 模型的编码器误差检测台

2.1 检测转台简介

不同于以往需由工作人员根据显示灯排进行人工读数、记录从而获得检测数据的检测方法, 新型编码器检测转台采用了编程灵活、功能强大的 LabVIEW 作为设计基础, 高效简洁, 结果直观。

LabVIEW^[7]是一种基于计算机的虚拟仪器开发平台, 在测量技术和仪器工程科学领域中得到了非常广泛的应用。基于 LABVIEW 的编码器自动检测转台实现了编码器检测数据的采集与显示、精度指标的实时计算、误差曲线的实时绘制以及检测数据的保存与打印等功能。它完全避免了以往人为因素带来的检测误差, 同时大大提高了编码器的检测效率。其误差检测窗口如图 2 所示。

2.2 RBF 模型与检测台的结合应用

检测工作完成后, 将获得的采样点处角度值以及相应点处的误差值作为样本数据传入至建立好的 RBF

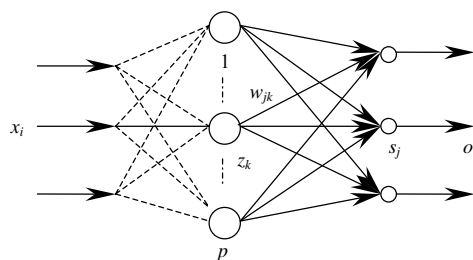


图 1 RBF 模型

Fig.1 RBF model



图 2 误差检测

Fig.2 Interface of error detection

模型中即可进行建模运算。由 RBF 模型的工作原理可知,其算法的一般过程是通用的,只需要对一些关键系数进行调整即可实现不同的补偿效果。将这些参数入口作为检测界面的一部分,当需要更改算法中的参数时,在用户操作平台上即可完成,每次更改参数后的误差曲线与精度指标都可以直观地在窗口上显示出来。如图 3 所示。

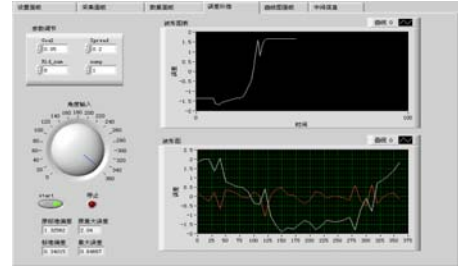


图 3 RBF 仿真分析

Fig.3 Simulation analysis of RBF model on error detecting system

3 RBF 算法优化

在检测转台上完成算法的仿真分析后,即可将获得的建模参数烧写至被测编码器的 DSP 中,完成真正的误差补偿运算。尽管神经网络计算公式相比其他网络相对简单,但当维数过高,隐节点过多时其实现速度就不尽如人意。在对运算时间有严格要求的场合,就要对算法进行优化以满足实际应用的需求。文中以 TMS320F2812 为例,对算法优化前后的运算时间与补偿精度进行了分析对比。

3.1 优化方法

由 RBF 拓扑结构可知:网络输出层只进行乘加运算,而 DSP 的典型特征就是乘加运算流水线技术,具有每个周期处理多条乘加运算的能力,所以这一层运算可采用原有公式。但网络隐层的计算过程则涉及到大量复杂运算,由于径向基函数为高斯函数,隐层为 e 的小数幂运算且涉及到矩阵运算,若直接采用原始公式进行计算,则消耗指令多、运算周期长,当隐层结点数过多时运算时间甚至会在毫秒级以上。因此,这一层就有必要根据算法特点与 DSP 的处理特征对其进行化简。

由 RBF 工作原理可知,隐层设计的目地就是反映输入向量 \mathbf{X} 偏离径向基函数中心 C_k 的程度。当输入 \mathbf{X} 恰好位于隐结点 k 的中心 C_k 时,由式(1)与式(2)可得:

$$\delta_k = \|\mathbf{X} - C_k\|_2 = 0 \quad (5)$$

$$z_k = \phi(\delta_k) = e^{-(\delta_k/b)^2} = e^{-(\|\mathbf{x}-c_j\|/b)^2} = 1 \quad (6)$$

随着 \mathbf{X} 远离 C_k , δ_k 增大, z_k 变小。因此对于隐层来说,一组输入向量只有进入某个或某几个隐结点可覆盖的空间才会产生输出,其它距离过远的隐结点则输出为 0。因此,程序设计过程中,可设一数值 Var ,当 $\delta_k = \|\mathbf{X} - C_k\|_2 > Var$ 时,直接令其输出 $z_k = 0$,而不必计算高斯函数的输出。

对于 $\delta_k = \|\mathbf{X} - C_k\|_2 \leq Var$ 的隐结点净输入,若按照高斯函数做 e 的小数幂运算则仍需耗费大量运算时间因此对其进行进一步化简。首先将径向基函数利用泰勒级数展开,即:

$$\exp(n) = 1 + n + \frac{n^2}{2!} + \frac{n^3}{3!} + \cdots + \frac{n^m}{m!} + \cdots \quad (7)$$

这里 n 即为式(6)中的 $-(\|\mathbf{x}-c_j\|/b)^2$,它体现了编码器采样点处角度值偏离所选径基函数中心 C_k 的程度。展开式的项数 m 可根据精度确定。但对于式(7)来说,当 $\|n\| > 1$ 时,需要 m 取值极大才能收敛,与设计原则不符。因此,对于 $\|n\| > 1$ 的指数运算需要进一步做如下处理:

$$\exp(n) = \exp(n - n_{\text{int}}) \cdot \exp(n_{\text{int}}) \quad (8)$$

其中 n_{int} 为幂指数的整数部分。对于整数部分的指数运算结果,直接采用查表法得到,小数部分的指数运算则按照上述泰勒级数展开式进行计算。这样所有的复杂运算都化简为 DSP 擅长的乘加运算。

3.2 优化结果对比

将上述方法应用至某 32 400 线/周增量式编码器上。为了验证方法的有效性,首先对 RBF 模型不进行精简,将其补偿结果与原始误差曲线进行对比,结果见图 4。

可测得,在未经 RBF 网络进行误差补偿时系统精度 $\sigma = 1.28''$; 补偿后系统精度 $\sigma = 0.32''$ 。进一步实验可知,采用 8 隐节点时 $\sigma = 0.30''$, 10 隐节点时 $\sigma = 0.27''$,可见系统精度有了明显改善。

在验证方法可行性的基础上,对方法进行优化并将优化前后的结果进行对比,结果见表 1。

由上可见,优化后并未对算法的补偿精度带来明显的精度损失,系统精度仍提高了 1~3 倍,但运算时

间有了明显的改善。对于大多数的编码器应用场合来说,上述运算时间均可满足实际需要。

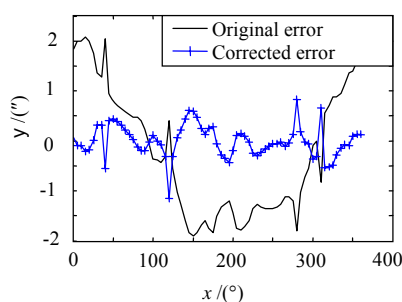


图4 6隐结点误差曲线对比

Fig.4 Comparison of error curves for RBF model with 6 hidden nodes

表1 优化前后结果对比

Table 1 Comparison results with different models

Number of hidden nodes	Precision after optimization /(")	Precision of original model /(")	Running time after optimization / μ s	Running time of original model / μ s
6	0.41	0.41	202	48
8	0.35	0.32	250	86
10	0.31	0.28	340	110
12	0.27	0.26	416	127

4 结 论

从工程应用角度对 RBF 网络在编码器误差补偿中的应用进行了分析探讨。利用 RBF 进行误差补偿,建模精度高,无需掌握误差的先验知识且具有良好的非线性处理特性,使得编码器误差补偿摆脱了以往需对复杂的误差成因做大量分析测试工作的过程。但如何将这一优势明显又运算复杂的方法应用至实际工作中仍有待于做深入的分析与研究。文中所探讨的方法,将检测过程与建模仿真相结合,使得以往单一的理论分析有了更切实的实用意义。而对应用在 DSP 上的算法进行优化处理,则使 RBF 方法完全具有了实用性。文中所采用的优化方法也可扩展至其它应用场合。

参考文献:

- [1] Chen S, Chng E S, Alkadhimi K. Regularized orthogonal least squares algorithm for constructing radial basis function networks [J]. **International Journal of Control**(S0020-7179), 1996, **64**(5): 829-837.
- [2] Alexandridis Alex, Bafas George. A new algorithm for online structure and parameter adaptation of RBF networks [J]. **Neural Networks**(S0893-6080), 2003, **16**(7): 1003-1017.
- [3] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学 精密工程, 2008, **16**(4): 598-604.
HONG Xi, XU Zhi-jun, YANG Ning. Error compensation of optical encoder based on RBF network [J]. **Opt. and Precision Eng.**, 2008, **16**(4): 598-604.
- [4] 王文成. 神经网络及其在汽车工程中的应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
WANG Wen-cheng. **Application of Neural Network in Automotive Engineering** [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998.
- [5] 李鸣鸣, 龚振邦. 长光栅误差的神经网络建模分析[J]. 机械与电子, 2004(6): 59-61.
LI Ming-ming, GONG Zhen-bang. Research on Neural Network Modeling of Linear Grating Error [J]. **Machinery and Electron**, 2004(6): 59-61.
- [6] 谢明红. 基于径向基函数网络的图像三维恢复技术在雕刻加工中的应用[J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(1): 117-123.
XIE Ming-hong. Application of 3D image recovering technology based on radial basic function network to engraving [J]. **Opt. and Precision Eng.**, 2007, **15**(1): 117-123.
- [7] 徐清雷, 邓正隆, 张传斌. 光纤陀螺刻度因子的建模方法[J]. 光电工程, 2004, **31**(12): 4-7.
XU Qing-lei, DENG Zheng-long, ZHANG Chuan-bin. Modeling method for scale factor of fiber optic gyroscope [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, **31**(12): 4-7.
- [8] 武嘉澍, 陆劲昆. LabVIEW 图形编程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
WU Jia-peng, LU Jin-kun. **LabVIEW Graphical Programming** [M]. Beijing: Peking University Press, 2002.