

一种储能电站火灾检测算法的 FPGA 实现研究

蔡志亮 黄小荣 熊伟标 唐振杰 廖博宏

广东电网有限责任公司东莞供电局

DOI:10.12238/pe.v3i5.16628

[摘要] 本文设计了一种基于反向传播(back propagation, BP)神经网络的FPGA火灾检测系统,专门为储能电站早期火灾检测应用研发。该系统利用FPGA部署BP神经网络,通过对温度、烟雾浓度、气体浓度数据进行处理从而达到对火灾快速准确检测的效果。在BP神经网络的部署过程中,本文选取了8-5-1的网络结构,首先通过Matlab对网络进行训练和测试,训练迭代次数为5000次,最终训练集识别准确率达到94.56%,测试集识别准确率达到93.8%,由此看出其具有良好的网络性能,而后为了减少BP神经网络部署在FPGA上时的资源消耗并提高处理速度,本文利用定点数据量化和流水线结构减小计算的复杂度;对神经元节点计算采用并行结构并且对于Sigmoid激活函数利用三次方程多段拟合的方法,这提高了系统的处理速度。最终对于火灾信息的识别率为93.5%,单次识别时间为3.24 μ s。因此该系统具有良好的可靠性和实时性,在储能电站早期火灾的检测中具有广阔的应用前景。

[关键词] 火灾检测; BP神经网络; FPGA; 硬件实现结构

中图分类号: S776.29+2 **文献标识码:** A

FPGA-Based Implementation of Fire Detection Algorithms in Energy Storage Power Stations

Zhiliang Cai Xiaorong Huang Weibiao Xiong Zhenjie Tang Bohong Liao

Guangdong Power Grid Co., LTD. Dongguan Power Supply Bureau

[Abstract] This paper presents the design of an FPGA-based fire detection system utilizing a back propagation (BP) neural network, specifically developed for early fire detection in energy storage power stations. The system implements a BP neural network on FPGA to process temperature, smoke concentration, and gas concentration data, thereby achieving rapid and accurate fire detection. In the deployment of the BP neural network, an 8-5-1 architecture was adopted. The network was first trained and tested in MATLAB, with 5,000 training iterations. The recognition accuracy of the training set reached 94.56%, while that of the testing set reached 93.8%, demonstrating strong network performance. To reduce resource consumption during FPGA deployment and to improve processing speed, fixed-point quantization and pipelined architecture were applied to lower computational complexity. A parallel computing structure was employed for neuron node operations, and the Sigmoid activation function was approximated using a piecewise cubic fitting method, which further enhanced processing efficiency. As a result, the fire detection accuracy reached 93.5%, and the recognition time per sample was 3.24 μ s. These results indicate that the proposed system demonstrates high reliability and real-time performance, showing great potential for application in early fire detection of energy storage power stations.

[Key words] Fire Detection; BP Neural Network; FPGA; Hardware Architecture

引言

随着社会的不断发展,目前火灾愈加频繁地威胁着人们的生命财产安全^[1],因此对火灾进行准确快速的检测非常重要,但是由于火灾发生的过程是一个极其复杂的物理化学过程,与环境的相关性很强,采用单一参数的火灾探测技术很难满足火灾的复杂性和多特征性^[2],尤其是在火灾初期,因为其火势尚小不易察觉,单一特征火灾检测技术常常会将之忽略,从而导致严重

损失。因此,采用多特征融合的检测技术才能更好地判定火灾是否发生,减少火灾的误报和漏报^{[3]-[4]}。

近年来神经网络不断发展,其在解决数据的分类、回归等问题上有了更广泛的应用。所以介于火灾检测的复杂性,处理此类问题使用神经网络是一个更优解,例如Okayama^[5]把神经网络应用到火灾检测技术之后,检测系统性能有很大的提升。在众多神经网络中,BP神经网络因其结构简单、泛化能力强等特点,在火

灾检测上有着广泛的应用,本文亦选用BP神经网络来进行火灾检测。但是此种火灾检测算法大多数还是以计算机平台为基础,而实际发生火灾时的检测环境远比其恶劣,所以实地检测火灾时需要以高适应性、低成本、高集成度等特点的平台为基础的检测系统,而FPGA很好的满足了这些需求,并且FPGA具有速度快、集成度高、可重载性强的特点,这是其他嵌入式平台所不具备的。

因此本文设计了一种基于FPGA的火灾检测系统,该检测系统通过在FPGA上部署BP神经网络对火灾的多特征信息进行处理从而实现火灾检测的功能。本文利用FPGA对神经网络脉动阵列的可重构体系进行研究,通过并行计算和流水线结构等设计优化方式缩短BP神经网络向前推理的时间和资源消耗,最终得到了可重构性强、实时性高、资源消耗小的火灾检测系统,该基于FPGA的火灾检测系统具有强大的应用潜力。

1 BP神经网络的结构及原理

BP神经网络是一种多层前馈神经网络,其由输入层、隐藏层、输出层构成。其中输入层的每个节点对应一个特征,隐藏层与输出层含有权重和偏置参数,这些参数在网络的训练过程中不断调整,以优化网络性能。

在BP神经网络中,其包括前向传播和反向传播两个过程,前向传播时输入数据通过网络各层逐步传递,并且层间的输出会通过Sigmoid等激活函数进行非线性变换。这些激活函数有助于模型捕捉复杂的非线性关系,使得神经网络能够处理更复杂的任务。

反向传播时BP神经网络会计算输出误差,而后计算修正量、更新输出层和隐藏层权重及偏置参数,从而再次重复前向传播的过程,经过不断重复上述两个过程最终会得到识别效果最好的网络。

本文在该网络结构基础上,选用8-5-1的单隐藏层BP神经网络结构,其包括8个输入层神经元、5个隐藏层神经元、1个输出层神经元,层间激活函数为sigmoid函数。

2 BP神经网络的训练与测试

对于BP神经网络的训练,本文选用Matlab平台进行,训练所用数据集一共有50000组数据,每组有8种数据,分别是温度、TVOC浓度、CO₂浓度、PM1.0浓度、PM2.5浓度、NC0.5浓度、NC1.0浓度、NC2.5浓度。这些数据涵盖了温度、气体浓度、烟雾浓度这三方面,能够更加全面准确地检测火灾的发生,减少漏报或者误报的情况。

在进行神经网络训练时,本文训练集和测试集的比例为8:2,即训练集有40000组数据,测试集有10000组数据,训练率设置为0.01,迭代次数设置为5000次。由于火灾检测是一个二分类问题,所以激活函数选用sigmoid函数,训练方法选择梯度下降法,其训练时的均方误差和识别准确率如图1所示。在经过5000次迭代后,网络均方误差仅有0.0413,火灾识别准确率达到94.56%。

3 BP神经网络的FPGA结构设计与测试

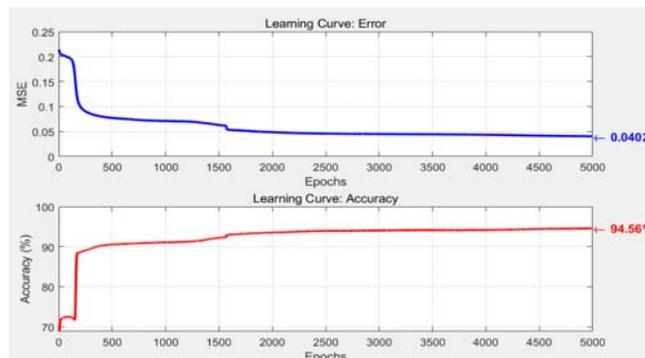


图1 训练时均方误差与识别准确率

本文使用Vivado软件平台作为FPGA主要开发平台,以Verilog语言为开发语言,采用ModelSim进行门级仿真,选用的芯片型号为xc7z020c1g400-2。由于将BP神经网络部署在FPGA上主要是为了进行火灾检测,所以该火灾检测系统只需实现BP神经网络的向前传播。

3.1 数据量化

由于FPGA本身的特点,其在进行浮点数运算时会消耗大量的资源,而使用定点数可以减少计算量,加快运算速度。因此在FPGA上实现BP神经网络的向前传播时,本文先将经过归一化之后的输入数据、各层的权重及偏执参数量化为16位的定点数,然后再对这些定点数进行处理,因为文献经过测试得出量化的定点数最小为16位时便可保证网络训练的收敛性和稳定性。

3.2 节点结构设计

由于选用的BP神经网络结构为8-5-1,即8个输入数据,5个隐藏层节点,1个输出层节点,所以在FPGA上设计隐藏层和输出层结构时,为减少运算时间并且充分利用FPGA的并行处理能力,本文例化了多个乘法器同时进行节点运算,神经元节点结构如图2所示。

3.3 sigmoid激活函数设计

Sigmoid函数是一种常用的激活函数,尤其在处理二分类问题时应用广泛,其函数表达式如式(1)所示。

由式(1)可知sigmoid激活函数图像关于(0, 0.5)对称,即如果用 $f(x)$ 表示正半轴的函数,则负半轴的函数可以用 $1-f(|x|)$ 表示,所以其函数表达式也可以写成(2)所示。因此在FPGA上设计sigmoid函数时只需设计其在正半轴的表达式即可,这样可以大大减少资源消耗。

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

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{-x}}, & x > 0 \\ 0.5, & x = 0 \\ 1 - \frac{1}{1 + e^{-|x|}}, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

sigmoid函数的硬件设计本文采用的是用三次多项式分段拟合的方式完成的,即用分段函数在[0, 1)、[1, 2)、[2, 3)、[3, 4)、[4, 5)、[5, 6)、[6, 7)、[7, 8)、[8, +∞)这些区间上分段拟合sigmoid函数。

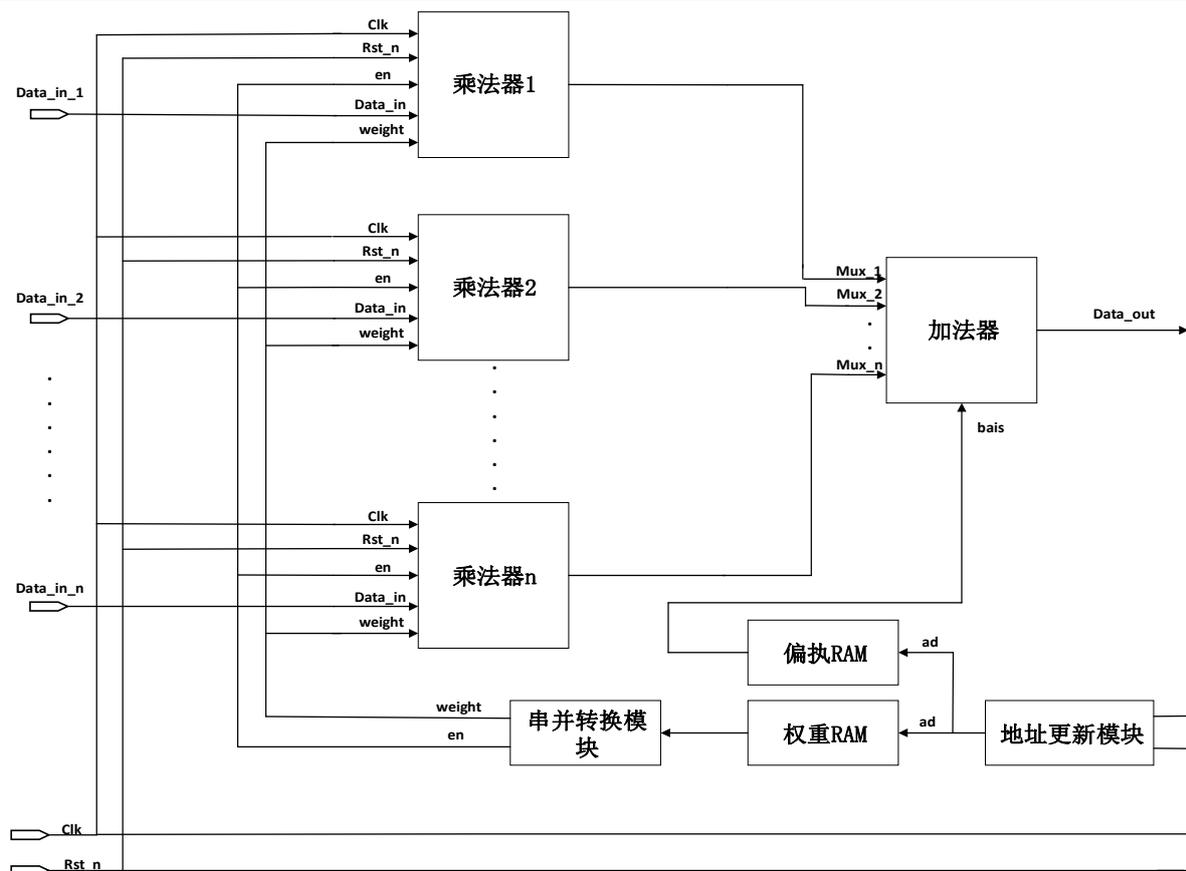


图2 神经元节点结构图

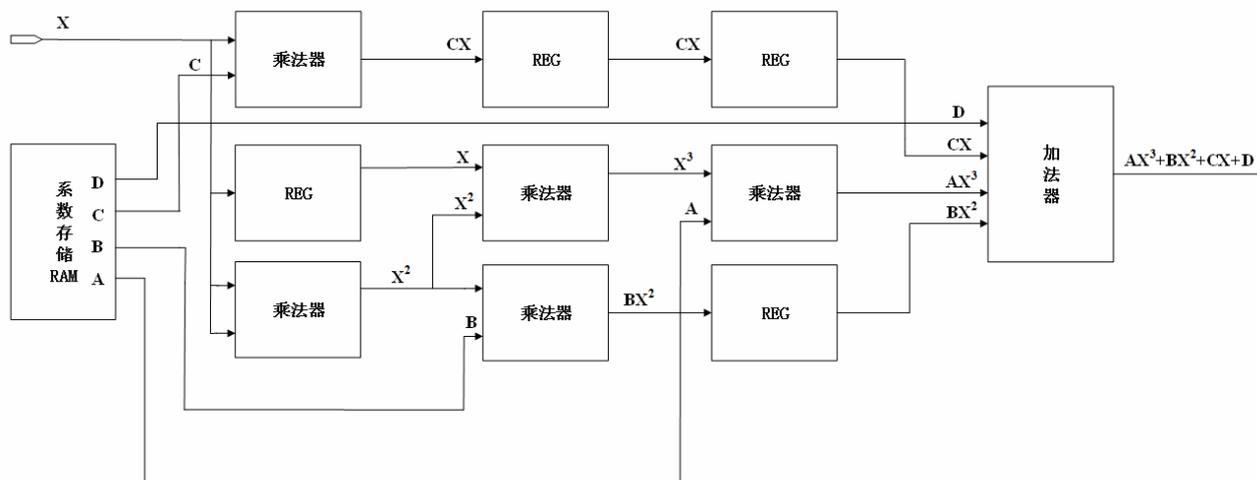


图3 三次多项式拟合sigmoid FPGA实现结构

在FPGA上实现sigmoid函数时,由表1可知三次函数表达式可以表示为 $f(x)=Ax^3+Bx^2+Cx+D$,显而易见这些表达式在硬件实现时可以采取流水线的结构实现,即先将系数存储在RAM中,而后先计算 Cx 和 x^2 ,再计算 Bx^2 和 x^3 ,然后计算 Ax^3 ,最后计算 Ax^3+Bx^2+Cx+D ,FPGA实现结构如图3所示。

3.4 BP神经网络顶层设计测试

本文为了测试这个网络的可行性,随机从数据集中选取了标签为发生火灾的数据进行仿真,顶层仿真结果如图4所示,图中result信号即为识别结果,0表示result的初始化值,1表示未发生火灾,2表示发生火灾,如图可知当送入数据3.24 μ s后BP神经网络识别结束,结束结果为发生火灾,火灾检测系统仿真正确。

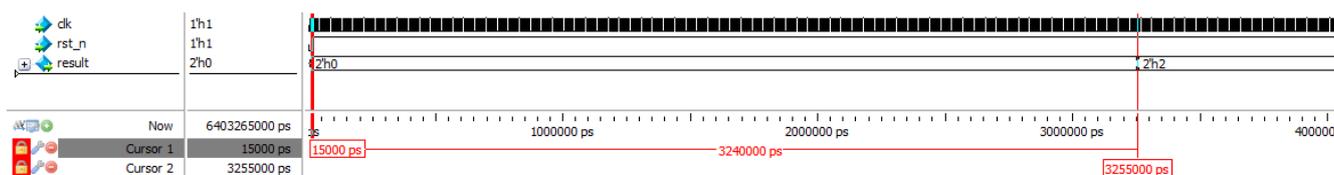


图4 BP神经网络顶层仿真

为了保证这个系统具有普遍性,随后本文随机从数据集中选取了5组数据和1000组数据分别进行ModelSim和Matlab火灾发生概率和识别效果仿真对比,最终测试结果如表1、表2所示,由表1可知两个平台火灾概率相当,之间绝对误差不超过0.0019,由表2可知BP神经网络的FPGA结构识别正确率能够达到软件识别的正确率,两者之间的误差不超过0.001。

表1 ModelSim和Matlab火灾发生概率对比

样本序号	标签	Matlab识别结果	Matlab火灾概率	ModelSim识别结果	ModelSim火灾概率	绝对误差
1	火灾	火灾	0.9999	火灾	0.9999	0.0000
2	没有火灾	没有火灾	0.0002	没有火灾	0.0000	0.0002
3	火灾	火灾	0.9729	火灾	0.9722	0.0007
4	火灾	火灾	0.9863	火灾	0.9866	0.0003
5	没有火灾	没有火灾	0.0011	没有火灾	0.0030	0.0019

表2 ModelSim和Matlab仿真正确率对比

测试平台	识别样本正确数量	识别准确率
Matlab	937	93.7%
Modelsim	936	93.6%

4 结论与展望

本文设计了一种基于FPGA的火灾检测系统,该系统将BP神经网络部署在FPGA上,通过识别温度、气体浓度、烟雾浓度从而对火灾进行快速准确的检测。此后本文对BP神经网络的原理及其训练进行分析,发现网络在经过大量迭代后训练集识别率达到了94.56%,测试集识别率达到了93.8%,表明网络具备良好火灾识别性能;而后本文又对BP神经网络的FPGA结构进行分析,确保能够充分利用FPGA的并行资源和流水线结构以减少识别时间,增强系统的实时性;最后本文对比了BP神经网络的FPGA仿真

结果与Matlab测试结果,发现两个平台测试1000组数据的识别结果误差不超过0.001,并且FPGA的识别正确率达到了93.6%,识别时间为3.24 μ s,这表明该基于FPGA的火灾检测系统具有良好的可靠性和实时性。

但仍有进一步研究的空间。后续工作可在以下几个方面展开:一是引入更先进的深度学习模型,以提升复杂环境下的识别精度;二是融合更多类型的传感信息,实现多参数协同检测;三是优化FPGA资源利用率,进一步降低功耗和硬件成本;四是在实际储能电站中开展长期稳定性和工程应用测试。通过这些改进,该系统有望在储能电站早期火灾预警中发挥更大的作用。

[基金项目]

南方电网科技项目“储能电站多参数协同极早期火灾探测预警技术研究”(031900KC23070050)。

[参考文献]

- [1]陶激光.消防产品创新对火灾应急响应的促进作用[J].项目工程,2025,3(2):148-150.
- [2]王殊,窦征.火灾探测及其信号处理[M].武汉:华中理工大学出版社,1998:154-161.
- [3]凤祥云,孙海艳,张万臣.基于光纤通信技术的物联网传感器系统[J].激光杂志,2016,37(7):131-134.
- [4]田淑芬,董军军,邱俊彦,等.红外线和烟感双保险报警器的研制[J].实验技术与管理,2018,35(6):253.256.
- [5]Okayama Y.A primitive study of a fire detection method controlled by artificial neural net[J].Fire Safety Journal,1991,17(6):535-553.

作者简介:

蔡志亮(1981--),男,汉族,广东东莞人,硕士,高级工程师,研究方向为储能电池故障分析。