

基于 BP 神经网络的集成电路故障诊断算法研究

郑利华¹ 黎 蕾¹ 王庆贺^{1*}
ZHENG Lihua LI Lei WANG Qinghe

摘 要

随着航天事业的快速发展,航天器中集成电路的性能和可靠性变得尤为重要。中央处理器(CPU)作为航天控制系统的核心集成电路部件,其性能直接影响航天设备的可靠性。在极端太空环境下,集成电路易受辐照和电学故障的影响,导致功能异常甚至失效,严重威胁航天器的在轨运行。由于辐射效应的不确定性和辐照数据收集的难度,当前针对集成电路故障诊断的研究仍有待深入。文章通过提取 CPU 故障模型的电学参数,设计并验证了一种基于反向传播(back propagation, BP)神经网络的集成电路故障诊断算法。通过构建 CPU 典型电路模型,模拟辐照和电学故障,提取故障特征参数,利用 BP 神经网络对故障进行分类和诊断。实验结果表明,该算法能够有效诊断 CPU 中的单粒子功能错误、单粒子门锁、总剂量效应、短路和开路等故障,诊断精度达到 99.1%,为航天器集成电路的故障诊断提供了一种高效、可靠的解决方案。

关键词

可靠性;集成电路;BP 神经网络;故障诊断

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.04.017

0 引言

航天器在太空中长期暴露于高能粒子的辐射环境中,辐射效应是导致集成电路失效的主要原因之一。据统计,航天器失效事件中约 45% 是由辐射效应引起的。此外,宇航环境中的热应力、机械冲击及封装老化也可能导致开路或短路故障^[1-2]。基于互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺的 CPU 是航天器控制系统的核心部件,对电离辐射极为敏感。瞬时电离辐射会导致电路瞬态电流增大,产生翻转、门锁甚至烧毁等问题,而长期辐射积累则会导致电路性能退化,产生功能故障^[3-4]。辐射故障特征多样,识别难度大,因此开展集成电路辐射故障诊断研究具有重要意义。

近年来,神经网络在故障诊断中的应用逐渐增多,但针对集成电路辐射故障的诊断研究仍较为有限^[5-7]。本文以 CPU 为研究对象,构建典型电路模型,模拟辐照和电学故障,提取故障特征参数,设计了故障诊断平台并验证了一种基于 BP 神经网络的故障诊断算法。该算法能够综合诊断辐照故障和电学故障,实现对 CPU 故障的精确诊断。

1 基于 BP 神经网络的集成电路故障诊断系统整体设计

基于 BP 神经网络的集成电路故障诊断系统分为故障诊断平台设计和 BP 神经网络软件平台设计,系统结构示意图如图 1 所示。无论是 BP 神经网络软件平台还是故障诊断平台,

最核心的还是故障诊断算法。BP 神经网络平台经过训练得到一组故障诊断算法的参数,然后将该参数移植到故障诊断平台中,对实际的电路进行故障诊断。

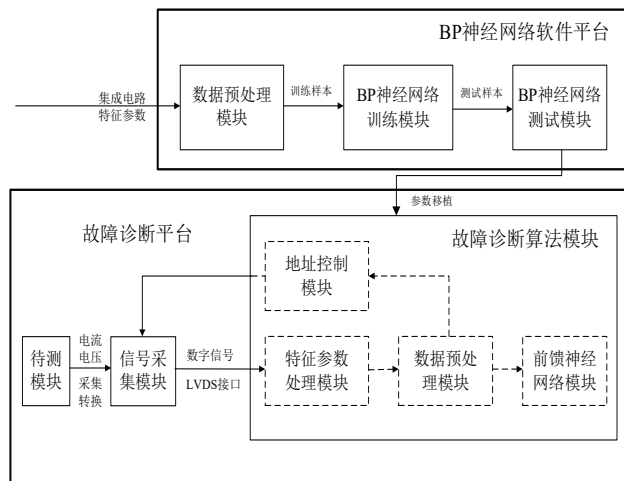


图 1 基于 BP 神经网络的集成电路故障诊断系统框图

2 故障模型构建

为了实现典型电路的单粒子功能错误、单粒子门锁和总剂量效应故障仿真,首先在 Cadence 软件的 Virtuoso 集成开发环境中建立典型电路模型;其次根据从器件模型的辐照效应仿真中提取的特征参数,建立辐照故障电路模型;短路和开路模型则通过外接电阻的方式模拟电路的短路和开路故障,建立电学故障电路模型。使用 Gem5 建立了 CPU 模型,

1. 中国电子科技集团公司第五十八研究所 江苏无锡 214072

并注入故障，建立 CPU 故障模型。

2.1 辐照故障单元模型构建

2.1.1 单粒子功能错误模型

在 MOSFET 单粒子功能错误的建模中，瞬态脉冲注入模型是当前常见的建模方法。本文构建的 MOSFET 单粒子功能错误故障模型时采用瞬态脉冲注入模型。在电路仿真软件 Virtuoso 中通过 Verilog-A 语言编写了瞬态脉冲注入模型，并将故障嵌入 MOSFET 模型中，构建 MOSFET 单粒子功能错误故障模型，该模型如图 2 所示。

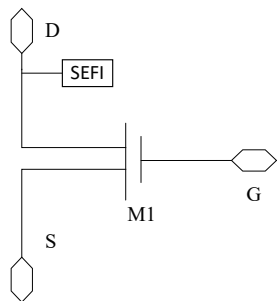


图 2 MOSFET 单粒子功能错误模型

2.1.2 单粒子门锁模型

使用 Verilog-A 语言在 Virtuoso 软件中建立单粒子门锁的 symbol 模型，该模型是一种单端口的电流源，电流值恒定，用以模拟 MOSFET 在发生单粒子门锁时的器件故障特征。仿真时通过 Python 脚本，提取 MOSFET 单粒子门锁仿真中不同条件下仿真环境下的电流值，将提取出的电流参数注入电流源模型中。Virtuoso 软件中 MOSFET 单粒子门锁模型如图 3 所示。

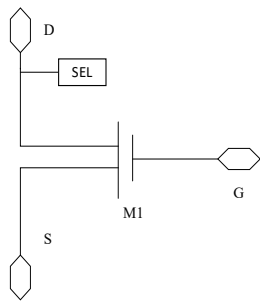


图 3 MOSFET 单粒子门锁模型

2.1.3 总剂量效应模型

在对 MOSFET 的总剂量效应进行研究之后，在 Virtuoso 中建立 MOSFET 阈值电压变化模型。MOSFET 电路级阈值电压漂移的仿真模型示意图如图 4 所示，即 MOSFET 总剂量效应模型。

通过在 MOSFET 的栅极外加电压源的方法来仿真总剂量效应下 MOSFET 的阈值电压漂移。仿真时通过 Python 脚本，提取总剂量效应仿真中不同条件下仿真环境下的阈值电压变化，将提取出的阈值电压变化量导入电压源中。

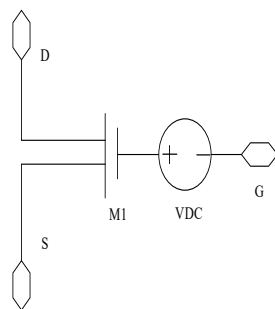


图 4 MOSFET 总剂量效应模型

2.2 CPU 故障模型构建

2.2.1 CPU 模型构建

论文采用体系结构模拟器 Gem5 建立 CPU 模型，采用故障资源量化的方法将辐照故障嵌入 CPU 模型中，采集故障下的电流电压特征参数，构建用于 BP 神经网络的故障样本数据集。

Gem5 具备多指令集架构（instruction set architecture, ISA）兼容性与可扩展处理器模型配置能力，是一种有用多种 CPU 模型的体系结构仿真器，Gem5 模拟器架构如图 5 所示。通过配置参数包括 CPU 指令集、工作频率、各级存储器容量、引脚电压等，建立 CPU 模型。

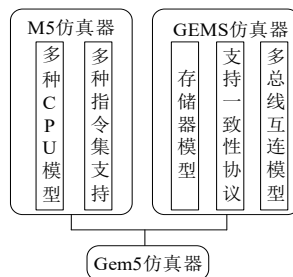


图 5 Gem5 模拟器架构图

2.2.2 CPU 模型故障注入

CPU 模型故障敏感单元包括寄存器电路、SRAM 电路、控制器电路及运算器电路。通过电路故障模型提取辐照敏感参数，将参数注入 CPU 模型，进行故障注入仿真和 CPU 功耗特征参数采集，再将功耗参数模型映射为电压模型和电流模型，实现器件级电学参数的精确表征。式（1）为故障资源密度与系统功耗的定量关系，生成故障功耗分布数据集。

$$P = P_{\text{dyn}} + P_{\text{st}} + \Delta P \cdot n \quad (1)$$

式中： P_{dyn} 表示动态功耗（W）； P_{st} 表示静态功耗（W）； n 表示故障资源数； ΔP 表示单元电路故障功耗变化（W）。

CPU 建模完成后，仿真采集功耗参数、资源分布密度及系统电学特性，量化提取各故障单元在特定故障模式下的功耗参数模型，并将功耗参数模型映射为电压参数模型和电流参数模型，构建待测 CPU 电路单粒子功能错误、单粒子门锁、总剂量效应、短路和开路故障数据集。

3 基于 BP 神经网络的故障诊断算法设计及验证

3.1 故障诊断算法设计

本文设计的故障诊断算法基于 BP 神经网络实现,即通过 BP 神经网络对提取的电路故障特征参数,如电流、电压等,进行识别和分类。

BP 神经网络工作时,将训练样本输入网络模型进行前向传播计算,将通过 BP 神经网络计算得到的结果和实际结果进行对比,计算出误差,通过误差反向传播更新网络,采用梯度下降算法,对网络的权重参数和偏差参数进行更新。当输出的误差值达到要求或者训练次数达标时,视为 BP 神经网络训练成熟。如表 1 所示。

表 1 故障诊断神经网络的输出类别

电路的工作状态	标签
正常	0
单粒子功能错误	1
单粒子门锁	2
总剂量效应	3
短路	4
开路	5

故障诊断算法输入参数为 8 路参数,分别为待测器件的 4 路电压和 4 路电流,诊断结果为单粒子功能错误、单粒子门锁、总剂量效应、开路、短路及正常状态六类状态。故障诊断算法的 BP 神经网络结构中,输入层维度确定为 8,分别代表 8 路诊断参数,输出层维度配置为 6 个分类节点,分别代表电路六类工作状态,如表 1 所示。考虑到故障数据集具有特征分布集中且输入参数维度较高的特点,模型采用多层网络架构以增强 BP 神经网络算法的非线性映射能力。最终实现的 BP 神经网络结构为 $8 \times 6 \times 6 \times 6 \times 6 \times 6$,以提升对复杂故障特征的辨识能力。BP 神经网络结构示意图如图 6 所示。

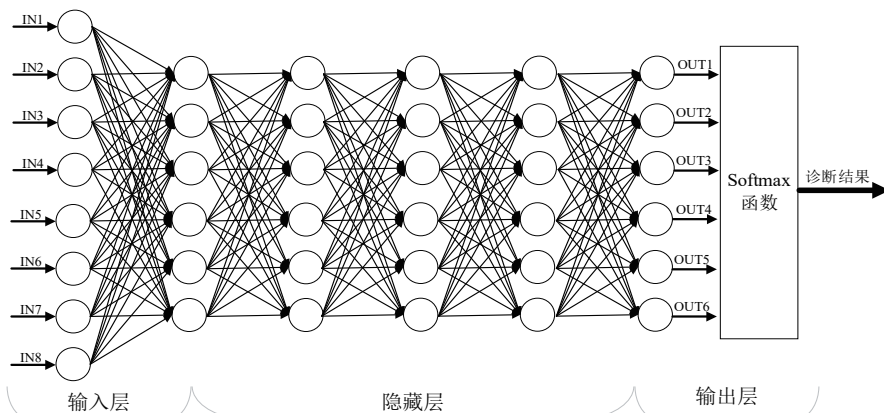


图 6 BP 神经网络结构示意图

3.2 故障诊断算法验证

电路故障模型中采集的数据以 csv 格式存储,通过 Python 提取并写入神经网络训练集和测试集中。

从采集的 100 000 个数据中随机选取 90 000 个数据作为训练集,对 BP 神经网络进行训练;选取 10 000 条数据作为测试集,对训练中和训练完成后的 BP 神经网络模型精度进行测试,得到仿真结果如表 2 所示。训练迭代次数在 4 000 至 5 000 次之间时 BP 神经网络故障诊断算法的精度达到稳定,设置迭代次数为 5 000 次。测试得到研究中基于 BP 神经网络的故障诊断算法诊断精度为 99.6%,证明了设计的故障诊断算法能够有效诊断出 CPU 中的单粒子功能错误、单粒子门锁、总剂量效应、短路和开路五种故障。

表 2 测试结果

迭代次数	精度
0	0.142
500	0.334
1 000	0.655
2 000	0.778
3 000	0.881
4 000	0.985
5 000	0.996

4 故障诊断平台设计与验证实验

4.1 故障诊断平台验证板设计

如图 7 所示,故障诊断平台验证板基于 FPGA 设计,主芯片采用国产化抗辐照 XC5VSX95T FPGA,同时还需要 1 片 FPGA 专用配置控制电路 71390 及 1 片 BPI Flash 实现对 FPGA 配置。信号采集模块采用抗辐照 A/D 转换器、电平转换芯片、模拟开关以及 4 片运算放大器组成。待测模块输出 CPU 的电压电流参数。待测模块输出 CPU 的电压电流参数。在集成电路故障诊断系统的设计与验证过程中,直接采用 CPU 等真实芯片构建待测模块进行检测的成本高昂,真实芯片的采购成本较高,且单粒子效应、总剂量效应等辐照故障的注入可能导致器件出现不可逆损伤。

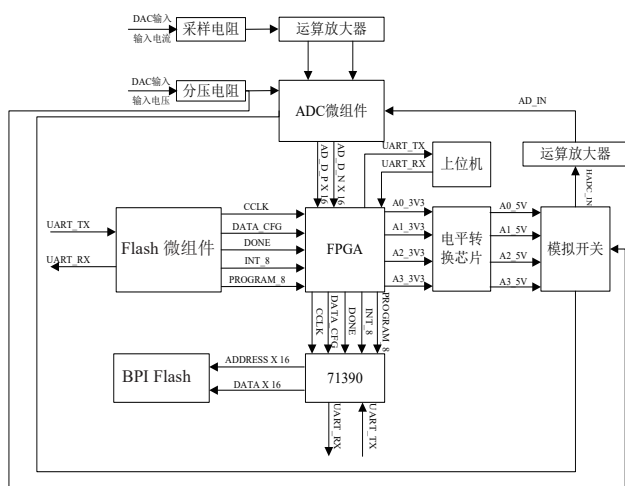


图7 故障诊断平台验证板系统结构示意图

待测模块输出CPU的电压电流参数。在集成电路故障诊断系统的设计与验证过程中,直接采用CPU等真实芯片构建待测模块进行检测的成本高昂,真实芯片的采购成本较高,且单粒子效应、总剂量效应等辐照故障的注入可能导致器件出现不可逆损伤。

为此,集成电路故障诊断平台验证实验采用DAC模拟待测集成电路故障时待测通路电学参数,电学参数基于待测器件故障实验及实际工况下故障的数据,精确复现故障状态下待测器件的电压和电流波形,输出待测器件CPU故障时的电压和电流数据,从而在有效降低实验成本的同时提升故障诊断系统的测试覆盖率。故障诊断平台验证板实物图如图8所示。



图8 故障诊断平台验证板实物图

4.2 故障诊断算法验证实验

故障诊断算法验证实验基于集成电路故障诊断平台验证板实现,通过验证板验证实际工作的情况下,故障诊断系统的功能性与准确性。

通过Flash串口烧写器将故障诊断算法程序烧录到抗辐照Flash中,通过上位机控制DAC发送故障数据,并开启故障诊断系统。信号采集模块采集DAC发出的待测集成电路故障数据,基于FPGA的故障诊断算法对测试样本进行分析,得出待测集成电路诊断结果。

系统验证实验使用采用1800条样本数据。对待测集成电路的电压和电流参数的采集频率为200 kHz,诊断周期控制在21 ms以下,准确诊断测试样本的数量为1784条,基于BP神经网络的集成电路故障诊断系统针对CPU的单粒子功能错误、单粒子门锁、总剂量效应、短路和开路五类目标故障的诊断准确度能够达到99.1%,故障诊断系统能够既快又准地实现对待测集成电路目标故障的诊断。

5 结论

本文研究了基于BP神经网络的集成电路故障诊断算法,重点解决了航天器中CPU在极端太空环境下的辐照和电学故障诊断问题。通过构建CPU典型电路模型,模拟单粒子功能错误、单粒子门锁、总剂量效应、短路和开路等故障,提取故障特征参数,利用BP神经网络对故障进行分类和诊断。实验结果表明,该算法在故障诊断精度上达到了99.1%,能够有效识别和分类多种故障类型,为航天器集成电路的故障诊断提供了一种高效、可靠的解决方案。未来的研究可以进一步优化神经网络结构,提高算法的鲁棒性和适应性,以应对更复杂的故障场景。

参考文献:

- [1] 王蓓. 航天电子元器件可靠性设计与分析[J]. 电子元器件与信息技术, 2020,4(1):13-14.
- [2] 任晨. 纳米MOS器件总剂量效应及TDDDB应力耦合研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [3] 张宏涛. 纳米MOS器件总剂量效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [4] 韩星, 王永琴, 曾娅秋, 等. 双极晶体管空间辐射效应的研究进展[J]. 环境技术, 2024,42(7):188-194.
- [5] 李宗霖. 基于忆阻器神经网络的集成电路辐射效应诊断系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [6] 王力, 刘子奇. WPA-IGA-BP神经网络的模拟电路故障诊断[J]. 系统工程与电子技术, 2021,43(4):1133-1143.
- [7] 吴玉虹, 王建. 基于Patches-CNN的模拟电路故障诊断[J]. 计算机工程与科学, 2025,47(1):35-44.

【作者简介】

郑利华(1989—), 男, 江苏淮安人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电路与信息系统。

黎蕾(1988—), 女, 湖北天门人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电子与通信工程。

王庆贺(1991—), 通信作者(email:928705312@qq.com), 男, 山东济宁人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 嵌入式系统设计。

(收稿日期: 2025-09-24 修回日期: 2026-04-10)