

ISSN 2095-9486 (网络) | ISSN 1674-7267 (印刷)

SCIENTIA SINICA Informationis

中国科学 信息科学

第52卷 第1期 2022年1月

www.scichina.com ■ infocn.scichina.com

中国科学
信息科学

第五十二卷 第一期
1-188

二〇二二年一月

《中国科学》杂志社

中国科学院主办
国家自然科学基金委员会

《中国科学》《科学通报》

总 主 编：朱作言

《中国科学：信息科学》编辑委员会

主 编：梅宏 北京大学

副 主 编：

赵沁平(常务)

北京航空航天大学

尤肖虎

东南大学

黄如

北京大学

张纪峰

中国科学院数学与系统科学研究院

秦玉文

广东工业大学

周志华

南京大学

编 委：

Zhenan BAO

Stanford University, USA

陈虹

同济大学

窦勇

国防科技大学

房建成

北京航空航天大学

胡事民

清华大学

季新生

国家数字交换系统工程技术研究中心

李学龙

西北工业大学

廖桂生

西安电子科技大学

刘允刚

山东大学

陆建华

清华大学

David Z. PAN

University of Texas at Austin, USA

Thomas PARISINI

Imperial College London, UK

Tielong SHEN

Sophia University, Japan

谭民

中国科学院自动化研究所

田捷

中国科学院自动化研究所

Jiangzhou WANG

University of Kent, UK

Jiannong CAO

The Hong Kong Polytechnic Univ., China

陈杰

同济大学

段海滨

北京航空航天大学

Fouad GIRI

University of Caen Normandie, France

胡振江

北京大学

纪越峰

北京邮电大学

连勇

上海交通大学

林东岱

中国科学院信息工程研究所

龙腾

北京理工大学

Wei D. LU

University of Michigan, USA

潘建伟

中国科学技术大学

Jian PEI

Simon Fraser University, Canada

苏翼凯

上海交通大学

唐杰

清华大学

王承祥

东南大学

王巍

北京航天控制仪器研究所

Ben M. CHEN

The Chinese University of Hong Kong, China

陈俊龙

华南理工大学

Xiangfeng DUAN

Univ. of California, Los Angeles (UCLA), USA

郝跃

西安电子科技大学

Jie HUANG

The Chinese University of Hong Kong, China

Zhong-Ping JIANG

New York University, USA

梁应敬

电子科技大学

Fangzhen LIN

The Hong Kong Univ. of Sci. & Tech., China

Chao LU

The Hong Kong Polytechnic Univ., China

马建峰

西安电子科技大学

潘泉

西北工业大学

齐越

北京航空航天大学

孙富春

清华大学

陶小峰

北京邮电大学

王东明

东南大学

王永良

中国人民解放军空军预警学院

Zidong WANG

Brunel University, UK

许军

清华大学

曾晓洋

复旦大学

张路

北京大学

张卫平

上海交通大学

Fu-Chun ZHENG

University of York, UK

周昆

浙江大学

Xiang-Gen XIA

University of Delaware, USA

徐宗本

西安交通大学

张健

中国科学院软件研究所

张氏

苏州大学

Xiaodong ZHANG

The Ohio State University, USA

仲盛

南京大学

周正威

中国科学技术大学

Lihua XIE

Nanyang Technological Univ., Singapore

尹浩

中国人民解放军军事科学院

张霖

北京航空航天大学

张钦宇

哈尔滨工业大学

张中山

北京理工大学

周东华

山东科技大学

顾 问:**包为民**

中国航天科技集团公司

JingSheng Jason CONG

Univ. of California, Los Angeles (UCLA), USA

郭光灿

中国科学技术大学

黄维

西北工业大学

李未

北京航空航天大学

沈昌祥

海军计算技术研究所

Dongming WANG

CNRS, France

吴伟仁

探月与航天工程中心

杨学军

中国人民解放军军事科学院

柴天佑

东北大学

Simon DELEONIBUS

Laboratorios LETI, France

郭雷

中国科学院数学与系统科学研究院

Hiroshi IWAI

Tokyo Institute of Technology, Japan

林惠民

中国科学院软件研究所

孙家广

清华大学

Martin D. F. WONG

University of Illinois, USA

吴一戎

中国科学院空天信息创新研究院

姚期智

清华大学

Cor CLAEYS

Interuniversity Microelectronics Centre, Belgium

高文

北京大学

怀进鹏

中华人民共和国教育部

金亚秋

复旦大学

吕建

南京大学

谭铁牛

中国科学院自动化研究所

吴宏鑫

中国航天科技集团公司

许宁生

中山大学

郑建华

解放军信息工程大学

青 年 编 委:**白翔**

华中科技大学

陈谋

南京航空航天大学

池保勇

清华大学

段润尧

百度量子计算研究所

贺威

北京科技大学

蔡一茂

北京大学

陈云霁

中国科学院计算技术研究所

崔斌

北京大学

郭团

暨南大学

胡程

北京理工大学

Ming CAO

University of Groningen, the Netherlands

Zhiyong CHEN

The University of Newcastle, Australia

崔琪楮

北京邮电大学

韩军伟

西北工业大学

黄昱

北京大学

黄欣沂

福建师范大学

李鸿一

广东工业大学

刘志新

中国科学院数学与系统科学研究院

庞彦伟

天津大学

宋令阳

北京大学

陶虎

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

王欣然

南京大学

武刚

电子科技大学

徐丰

复旦大学

杨亮

湖南大学

虞文武

东南大学

张敏灵

东南大学

朱鹏程

东南大学

贾庆山

清华大学

李韬

华东师范大学

马晓星

南京大学

任奎

浙江大学

苏晓龙

山西大学

王慧明

西安交通大学

王兴军

北京大学

吴争光

浙江大学

许斌

西北工业大学

杨玉超

北京大学

翟广涛

上海交通大学

钟财军

浙江大学

左旺孟

哈尔滨工业大学

李海涛

山东师范大学

廖小飞

华中科技大学

孟德宇

西安交通大学

沈红斌

上海交通大学

孙晓明

中国科学院计算技术研究所

王润声

北京大学

王曾晖

电子科技大学

邢焕来

西南交通大学

杨军

东南大学

俞扬

南京大学

翟天瑞

北京工业大学

Huiling ZHU

University of Kent, UK

责任编辑：宋扉 冯景 蒋恺 杨海燕

封面设计：胡煜

目 次

评述

面向实时视频流分析的边缘计算技术.....	1
杨铮, 贺晓武, 吴家行, 王需, 赵毅	
科学训练辅助: 柔性可穿戴传感器运动监测应用.....	54
苏炳添, 李健良, 徐慧华, 徐泽, 孟建新, 陈小平, 李风煌	

论文

连续无监督异常检测.....	75
倪一鸣, 陈松灿	
面向半监督聚类的最优间隔分布学习机.....	86
张腾, 黎铭, 金海	
群体智能系统的动力学模型与群体熵度量.....	99
罗杰, 姜鑫, 郭炳晖, 郑宏威, 吴文峻, 吕卫锋	
一种高效的面向高并发图分析任务的存储系统.....	111
赵进, 姜新宇, 张宇, 廖小飞, 金海, 刘海坤, 杨赞, 张吉, 王彪, 余婷	
BeautyGAN+: 基于全新 PMT 数据集的美妆转移混合监督学习算法.....	129
白玉, 颜波, 谭伟敏	
基于田字格变换的自监督汉字字体生成.....	145
曾锦山, 陈琪, 王明文	
室内空气质量物联网部署、优化和数据预测.....	160
张楠, 白子轩, 张泓亮, 宋令阳	
基于闪存的可编程线性忆阻器及其存算一体化电路与系统.....	176
赵亮, 高世凡, 张圣波, 邱翔, 杨帆, 李杰, 陈泽志, 赵毅	

Contents

REVIEW

Edge computing technologies for streaming video analytics 1

Zheng YANG, Xiaowu HE, Jiahang WU, Xu WANG & Yi ZHAO

Scientific athletics training: flexible sensors and wearable devices for kineses monitoring applications 54

Bingtian SU, Jianliang LI, Huihua XU, Ze XU, Jianxin MENG, Xiaoping CHEN & Fengyu LI

RESEARCH PAPER

Continual unsupervised anomaly detection 75

Yiming NI & Songcan CHEN

Optimal margin distribution machine for semi-supervised clustering 86

Teng ZHANG, Ming LI & Hai JIN

Dynamic model and crowd entropy measurement of crowd intelligence system 99

Jie LUO, Xin JIANG, Binghui GUO, Hongwei ZHENG, Wenjun WU & Weifeng LV

An efficient storage system towards high throughput of concurrent graph processing jobs 111

Jin ZHAO, Xinyu JIANG, Yu ZHANG, Xiaofei LIAO, Hai JIN, Haikun LIU, Yun YANG,

Ji ZHANG, Biao WANG & Ting YU

BeautyGAN+: mixed-supervised makeup transfer learning algorithm based on new PMT dataset 129

Yu BAI, Bo YAN & Weimin TAN

Self-supervised Chinese font generation based on square-block transformation 145

Jinshan ZENG, Qi CHEN & Mingwen WANG

Deployment, optimization and data prediction of Internet of Things for indoor air quality 160

Nan ZHANG, Zixuan BAI, Hongliang ZHANG & Lingyang SONG

Programmable linear random-access memory and its in-memory computing circuits and systems
based on flash memory 176

Liang ZHAO, Shifan GAO, Shengbo ZHANG, Xiang QIU, Fan YANG, Jie LI,

Zezhi CHEN & Yi ZHAO



基于闪存的可编程线性忆阻器及其存算一体化电路与系统

赵亮^{1,3}, 高世凡¹, 张圣波², 邱翔², 杨帆¹, 李杰³, 陈泽志³, 赵毅^{1*}

1. 浙江大学信息与电子工程学院, 杭州 310027

2. 上海闪易半导体有限公司, 上海 201210

3. 合肥睿科微电子有限公司, 合肥 230088

* 通信作者. E-mail: yizhao@zju.edu.cn

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-07-27; 接受日期: 2021-08-09; 网络出版日期: 2022-01-06

科技创新 2030 — “新一代人工智能” 重大项目 (批准号: 2020AAA0109001)、浙江省重点研发计划 (批准号: 2021C01039) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2020XZZX005-06) 资助项目

摘要 基于新型非易失性存储器和存内计算架构的神经网络推理芯片在功耗、速度和存储密度等方面展现出突出的优势, 使其在物联网和边缘计算等应用领域受到广泛关注. 在本文中, 我们详细介绍了一款基于可编程线性忆阻器 (programmable linear random-access memory, PLRAM) 的存算一体化片上系统芯片的设计和实现方法. 为了在资源受限条件下实现高效的推理计算, 该系统结合了器件、电路和系统层面的一系列新技术, 包括具备每单元 7 比特存储能力的新器件、数据自适应写入、电路失配补偿, 以及基于残差模型训练的模型部署技术. 这些新技术帮助该系统实现优越的整体性能, 使其具有紧凑的外观尺寸, 超过 10 TOPS/W 的能效和接近 95% 的计算精度, 并被成功应用于一款低功耗、低成本的语音多关键词识别产品.

关键词 存算一体化, 片上系统, 改进型浮栅晶体管, 可编程线性忆阻器, 模型部署技术

1 引言

近年来, 融合了人工智能算法的感知计算系统被逐渐应用于物联网领域, 形成了一类新型的技术生态——智能物联网 (artificial intelligence of things, AIoT). 智能物联网硬件的特点是将计算能力尽量向边缘终端移动, 并在此基础上充分运用人工智能算法, 加速端侧数据处理和交互感知的能力. 具体而言, 端侧人工智能算力能够对传感器所产生的海量数据 (如图像、语音等) 进行预处理, 提取出有效特征后再进行传输或本地消化使用, 从而缩减单个传感器所需的网络带宽. 在带宽一定的前提下, 智能物联网终端允许部署数量和种类更多的传感器, 从而为物联网设备带来更丰富的功能和更好的用

引用格式: 赵亮, 高世凡, 张圣波, 等. 基于闪存的可编程线性忆阻器及其存算一体化电路与系统. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 176–186, doi: 10.1360/SSI-2021-0157

Zhao L, Gao S F, Zhang S B, et al. Programmable linear random-access memory and its in-memory computing circuits and systems based on flash memory (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 176–186, doi: 10.1360/SSI-2021-0157

用户体验. 目前, 在个人可穿戴设备、智能家居、智慧城市和工业自动化等领域中, 智能物联网的应用模式正得到广泛的研究和探索, 以期实现更好的服务质量 (quality of service, QoS)、人机交互和实时决策效果. 伴随着这一发展趋势, 电路和系统设计者也面临着新的技术挑战, 包括但不限于:

- 随着传感器技术的发展, 能通过物联网设备收集和处理的的数据量呈现爆炸性增长;
- 端侧的通信带宽有限, 即使采用 5G 技术也难以跟上数据量增长的步伐;
- 端侧的能源供应有限, 对边缘侧人工智能算力的能效提出了更高的要求;
- 传统的硬件架构在处理数据密集型的人工智能任务时功耗较高、效率较低.

为了应对这些挑战, 新的计算范式和系统设计方法 (如存内计算、近存计算等) 正受到越来越多的关注. 以存内计算为例, 其主要动机是解决传统冯·诺依曼 (von Neumann) 架构的计算系统中“存储墙”的问题. 这类问题的根源是: 在传统冯·诺依曼架构中计算和存储单元是分离的, 因此在处理深度神经网络 (deep neural network, DNN) 之类的数据密集型任务时, 需要在处理器和存储器之间频繁地交换数据, 从而形成了系统性能和功耗的一个瓶颈^[1]. 相比之下, 存内计算范式将计算和存储功能整合到同一个存算一体化单元之中, 从而克服了存储墙问题, 在单位能效、成本和计算速度方面提供了一些显著优势^[2]. 根据所采用的存储器技术的不同, 存算一体化单元又可以分为易失性和非易失性两类. 前者通常基于 SRAM (static random access memory) 或者 DRAM (dynamic random access memory), 需要在系统启动时将计算模型重新加载到存储器阵列当中, 后者 (包括 RRAM (resistive random access memory), PCM (phase change memory), MRAM (magnetic random access memory) 等新型存储器技术在内) 则没有此类限制. 由于非易失性存算一体化单元能消除静态功耗, 并使得系统在恢复供电时能够即时开启 (无需重新加载模型和算法), 因此日益成为智能物联网应用的首选技术之一^[3].

本文介绍了一款基于存算一体化技术的语音识别片上系统 (system on chip, SoC) 芯片的设计和实现细节, 该系统采用改进型浮栅晶体管器件做为神经网络加速器, 并结合了制造工艺、电路设计和系统集成方面的一系列创新技术和技巧, 其目标应用是在终端资源 (功耗、带宽等) 受限情况下的语音关键词识别. 本文的主要创新点归纳如下:

- 基于改进型浮栅晶体管器件和微秒级自适应写入技术, 实现了每单元 7 比特的存储功能, 从而最大程度地提高权重数据的存储密度并降低芯片测试成本.
- 提出了基于迁移学习思想的模型部署技术, 采用训练残差模型的方法对部署后的模型参数进行微调, 从而显著改善了权重部署过程中的精度退化问题.
- 基于存算一体化 SoC 实现了一款语音多关键词识别产品, 具有体积小、功耗低和价格低等优势, 在实时处理中能够实现大于 10 TOPS/W 的能效和 94.8% 的计算精度.

2 基于改进型浮栅晶体管的存算一体化片上系统

2.1 改进型浮栅晶体管

本文的存算一体化片上系统的核心是由改进型浮栅晶体管构成的存算一体化阵列, 用于加速神经网络中向量和矩阵相乘这一关键操作. 实际应用中, 通常采用字线上的输入电压来表示输入向量的值, 采用阵列中每个交叉点的器件电导来表示神经网络模型的权重, 通过测量位线上累积的电流之和得到乘加运算在每个维度上的结果. 在这样的计算范式中, 根据基尔霍夫 (Kirchhoff) 电压和电流定律可知, 如果要进行多比特权重的运算, 则器件电导应和权重值呈严格的线性关系.

本文中, 电导的连续调节是通过控制改进型浮栅晶体管的阈值电压而实现的. 虽然以 ETOX 结

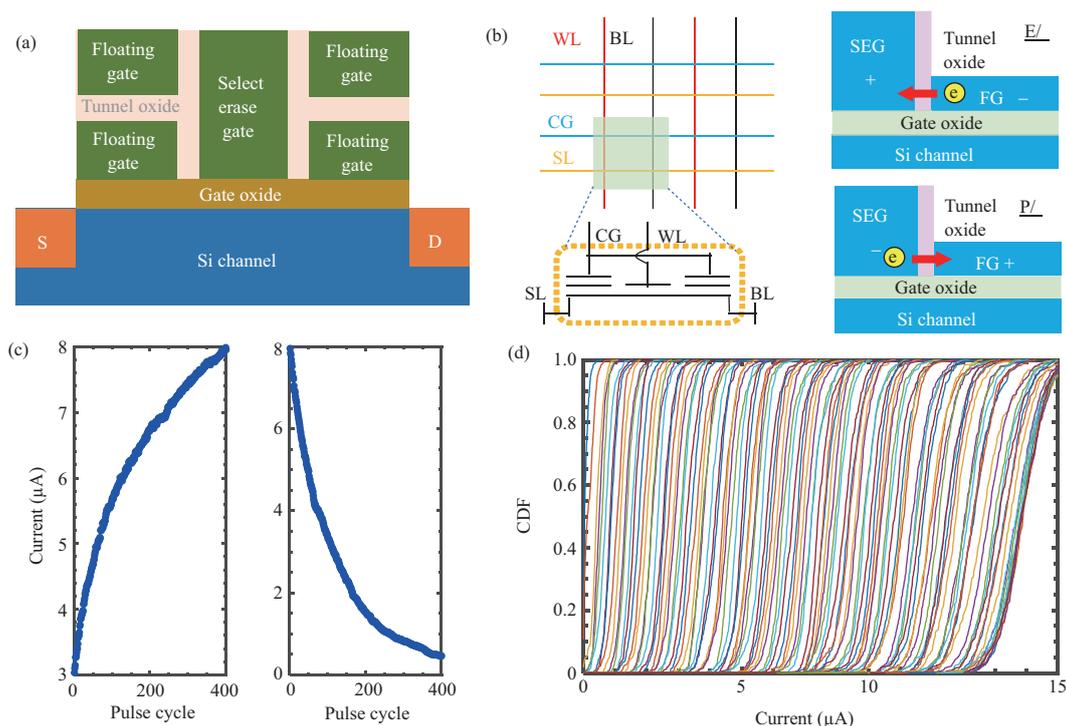


图 1 (网络版彩图) (a) PLRAM 器件结构示意图; (b) 对器件进行逐步擦除和编程操作的示意图; (c) 单个 PLRAM 器件对固定擦除和编程电压的响应; (d) 在 876×128 阵列分块上的编程结果, 显示阵列具有 7 比特/单元的编程能力

Figure 1 (Color online) (a) Illustration of PLRAM devices^[4]; (b) operation scheme for gradual erasing and programming; (c) single cell current response of PLRAM to constant-voltage erase pulses; (d) programming results of an 876×128 sector, demonstrating 7-bit/cell capability

构^[4,5]为代表的浮栅晶体管器件长期以来都被作为多态存储器使用, 但是存算一体化应用对于多态存储的要求和传统存储器存在差异: 传统存储器读数据时往往采用恒定电压, 而神经网络计算中, 电压由输入信号决定而非恒定, 因此要求器件在整个工作区间内都处于线性区, 可以使用的阈值电压范围相比存储应用也更为有限. 为了解决这一问题, 团队在前期工作中提出了一种改进型的浮栅晶体管器件^[6], 并将其命名为可编程线性随机存储器 (programmable linear random-access memory, PLRAM). 该器件的结构特点是具有两组浮栅 (floating gate, FG) 和控制栅 (control gate, CG) 堆叠在一起形成的 Etox 结构, 两组结构之间则有一个选择擦除栅 (select erase gate, SEG) 用于选通和横向擦除操作. 通过使用双向 F-N 隧穿, 这一新型器件实现了浮栅中电子高度可控的注入 (编程) 和移除 (擦除) 调节 (图 1(a)~(c)). 在注入电子时, SEG 端将被抬升至高电压, 而 CG 端将被拉至低电压, 从而实现基于 F-N 隧穿的电子注入 (图 1(b)). 这一操作模式不同于传统闪存所使用的基热载流子注入, 能够更高效且准确地控制电子数的变化. 进一步地, 通过自适应的编程和擦除迭代, PLRAM 阵列能够在兆字节规模上实现 7 比特/单元的编程精度 (图 1(c) 和 (d)), 从而保证器件电导和权重值的精确对应. 结合并行输入和输出, PLRAM 能够作为神经网络加速器中的基本突触单元实现高效的存内计算.

2.2 系统架构

图 2(a) 展示了基于改进型浮栅晶体管所设计的存内计算 SoC 的系统架构. 该系统包括 PLRAM 器

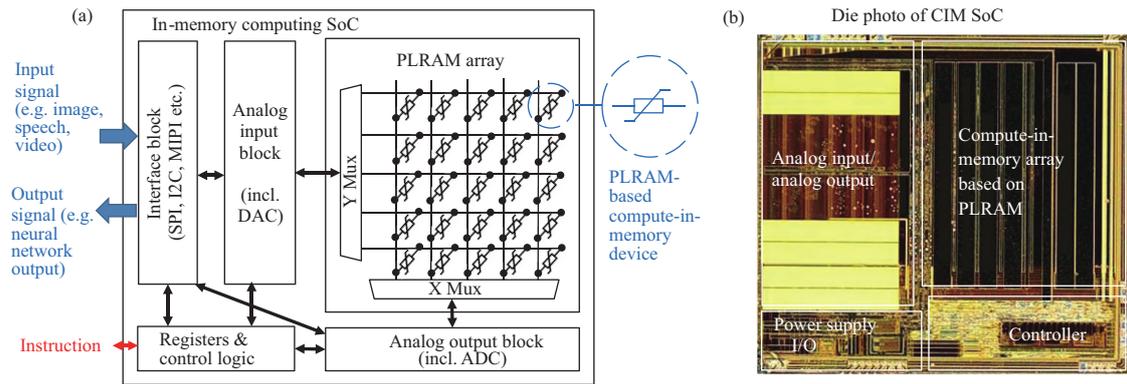


图 2 (网络版彩图) (a) 基于改进型浮栅晶体管设计的存算一体化片上系统的芯片架构, 包含了存算一体化阵列、模拟输入和输出模块、控制逻辑和接口模块; (b) 存算一体化片上系统的实物照片 (Hexagonal 芯片)

Figure 2 (Color online) (a) System architecture of the in-memory computing SoC designed based on novel flash memory; (b) die photo of the in-memory computing SoC chip (Hexagonal-A01) based on novel flash memory

件组成的存算一体化阵列、模拟输入模块 (包含了数模转换单元 DAC (digital-to-analogue conversion))、模拟输出模块 (包括模数转换单元 ADC (analogue-to-digital conversion))、控制逻辑模块和 I/O 接口模块. 按照前文所述的计算范式, 语音或视频流等输入信号在进入存算一体化阵列前, 首先将通过接口模块, 然后由模拟输入模块转化为模拟信号并作用于阵列的字线. 运算完成后, 模拟输出模块会检测位线上的电流值并将其转化为计算结果, 再经过 I/O 接口输出结果.

本文中的存算一体化 SoC 芯片是基于 90 nm CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 工艺平台实现的 (图 2(b)), 该工艺平台提供的嵌入式闪存解决方案能够实现 PLRAM 存算一体化单元所需的工艺流程. 本文中单个 SoC 芯片的存储阵列规模达到 2048×3096 , 合计有超过 600 万个新型 PLRAM 单元. 假设每单元能够存储 7 比特权重数据, 则单芯片能实现的权重数据存储容量为 42 兆位, 广泛适用于语音识别应用中的一些常用神经网络模型. 该存储阵列的工作模式分为数据模式和存算模式. 在数据模式中, 该阵列的所有存储单元可采用统一的方法寻址和写入、读取操作, 类似于常见 NOR Flash 的操作模式; 在存算模式中, 可以通过行列选择器选通阵列中的一个子阵列进行乘加计算. 在处理多层神经网络的计算时, 每层的输出会暂存到容量为 10 Kb 的 SRAM 缓存中并用于下一层输入, 直至最终向片外输出控制信号. 在 2.3 和 2.4 小节中, 将详细讨论模拟输入和模拟输出模块的详细设计方案.

2.3 模拟输入模块的设计

图 3 展示了包含输入缓冲器和 8 位数模转换功能的模拟输入模块的设计方案. 在这一设计中, 精度为 8 位的输入数据被按位分开, 以高低电平的形式同时施加到 8 个上拉晶体管的栅极. 每个上拉晶体管的沟道宽长比 (W/L) 按照 1:2:4:8:16:32:64:128 的比例设计以对应不同的位权, 它们的作用是将输入的高低电平转换为等比例的电流并汇聚到输出端.

如图 3(a) 所示, 由输入数据产生的上拉电流可以通过一个电阻转化为输出电压, 并施加到存算一体化阵列的输入缓冲器上. 但是, 这样的设计存在一定缺陷: 每条输入数据的字线都需要使用一组数模转换器和缓冲器, 因此不同输入字线之间电阻阻值和晶体管特性可能会产生较大的波动, 造成失配问题从而降低存算一体化的计算精度. 为了补偿输入电路的失配问题, 本文提出了如图 3(b) 所示的模拟输入模块设计, 该设计采用一个浮栅晶体管代替电阻来产生输入电压. 采用这样的设计, 可以通过调整

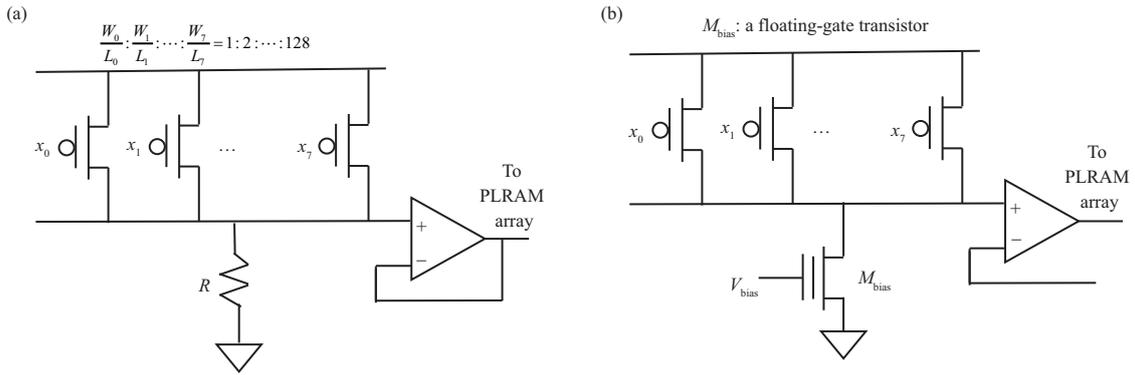


图 3 模拟输入模块的电路原理图。(a) 按位权设计的上拉晶体管用于实现数模转换, 并通过下拉电阻转为输出电压; (b) 采用等效电阻可调节的浮栅晶体管代替下拉电阻, 用于解决电路失配问题

Figure 3 Circuit diagram of the analog input block. (a) DAC based on pull-up transistors and a pull-down resistor; (b) DAC with a trimmable floating-gate transistor replacing the pull-down resistor, which helps to compensate the mismatch problem of the circuits

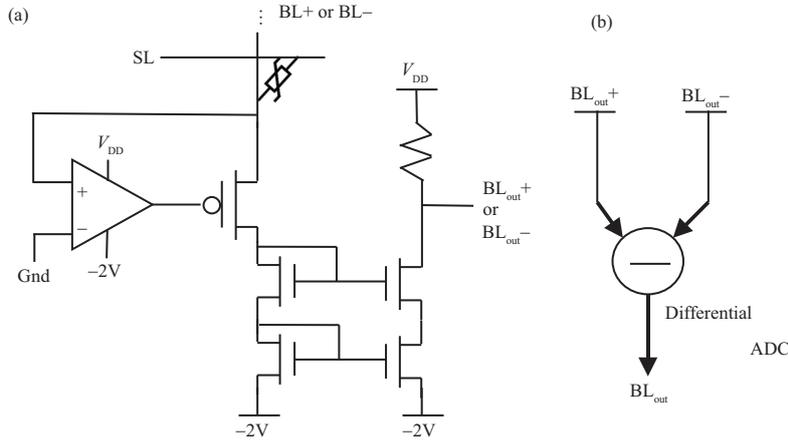


图 4 模拟输出模块的电路原理图。(a) 带有两级级联电流镜的感测放大器, 用于生成输出电流或电压; (b) 差分模数转换器, 用于将存储正负权重的两条位线的累加结果相减并输出计算结果

Figure 4 Circuit diagrams of the analog output block. (a) Sense amplifier with cascade current mirror for output voltage sensing; (b) schematics of positive and negative output subtraction with differential ADCs

阈值电压来改变浮栅晶体管 (M_{bias}) 的等效电阻, 使得所有数模转换器针对相同的输入数据产生一致的输出模拟电压, 从而消除彼间的失配. 这一配置阈值电压的过程又被称为电路参数匹配 (trimming).

2.4 模拟输出模块的设计

图 4 展示了模拟输出模块的设计方案. 该模块由一组能够精确复制电流的两级级联电流镜和一个用于检测输出结果的差分模数转换器组成. 级联电流镜可以将位线上各存算一体化单元累加的电流精确复制到旁路上, 用于产生输出电压并隔绝干扰. 本文中的存算阵列采用了正负权重分离存储的方案, 即相邻的一对位线上分别存储计算模型中权重的正值分量和负值分量, 而差分模数转换器的作用则是将两条位线的电流和相减并输出计算结果. 该模数转换器的输出精度为 10 bit. 在存算一体化单元存储精度不变的前提下, 这样的设计有效地扩展了权重值的动态范围, 等效于增强了神经网络的计

4. 学位论文

Ren Y G. Study on data visualization methods and related techniques for clustering. Dissertation for Ph.D. Degree. Shenyang: Northeastern University, 2006 [任永功. 面向聚类的数据可视化方法及相关技术研究. 博士学位论文. 沈阳: 东北大学, 2006]

格式: 姓名缩写. 文题. 学位论文. 地址: 单位, 年. 页码

5. 技术报告

Phillips N A. The Nested Grid Model. NOAA Technical Report NWS22. 1979

格式: 姓名缩写. 文题. 报告名. 年

6. 专利文献

Plank C J, Posinski E J. US Patent, 4 081 490, 1978-02-15

格式: 姓名缩写. 专利国籍, 专利号

7. 使用手册

Wang D L, Zhu J, Li Z K, et al. User Manual for QTKMapper Version 1.6, 1999

格式: 姓名缩写. 手册名称及版本号, 年

8. 计算机软件

Hemodynamics III: The ups and downs of hemodynamics. Version 2.2. Orlando (FL): Computerized Educational Systems. 1993

9. 光盘版材料

Anderson S C, Poulsen K B. Anderson's Electronic Atlas of Hematology. Philadelphia: Lippincott Wilkins, 2002

10. 网络版材料

Christine M. Plant physiology: plant biology in the Genome Era. Science, 2003, 281: 331—332 [2003-09-23]. <http://www.sciencemag.org/anatmorp.htm>

地 址: 北京东黄城根北街 16 号
电 话: (010) 64015683 (编辑部)
(010) 64019709 (发行部)
传 真: (010) 64016350

邮政编码: 100717
电子信箱: informatics@scichina.org (编辑部)
sales@scichina.org (发行部)

中国科学 信息科学

SCIENTIA SINICA Informationis

第 52 卷 第 1 期 2022 年 1 月出版

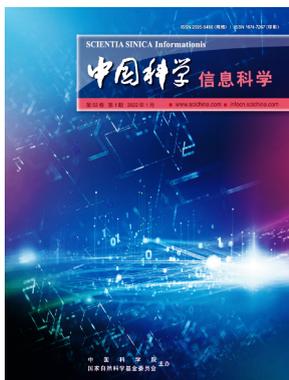
版权所有, 未经许可, 不得转载

主 管	中 国 科 学 院	主 编	梅 宏
主 办	中 国 科 学 院 国家自然科学基金委员会	出 版	《中国科学》杂志社
编 辑	中 国 科 学 院 《中国科学》编辑委员会	印刷装订	北京科信印刷有限公司
		总发行处	北京报刊发行局
		订 购 处	全国各邮电局、《中国科学》杂志社发行部

为加强版权保护, 本刊自 2020 年起在封面加贴《中国科学》杂志社防伪标签. 每个防伪标签上均有编号, 防伪请拨打 010-64019709. 凡未贴防伪标签为盗版, 违法必究.

ISSN 1674-7267
CN 11-5846/TP

广告发布登记: 京东工商广登字 20170194 号
国内邮发代号: 80-948 每期定价: 200.00 元 全年定价: 2400.00 元



CN: 11-5846/TP

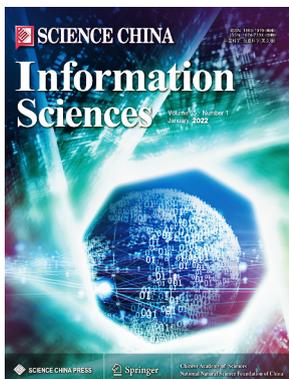
- 主管单位: 中国科学院
- 主办单位: 中国科学院, 国家自然科学基金委员会
- 收录语种: 中文
- 主编: 梅宏

中国科学: 信息科学 (月刊) SCIENTIA SINICA Informationis

简介: 力求刊载信息科学领域最高学术水平的中文文章, 及时报道计算机科学与技术、控制科学与控制工程、通信与信息科学、微电子与固体电子学等领域基础与应用研究方面的原创性成果. 推动信息科学技术发展, 搭建理论与技术应用的桥梁, 促进与各学科、各行业的交叉融合. 月刊, 每月20日出版. 中、英文版是相对独立的两个刊物.

栏目: 评述、论文、观点与争鸣、快报、学术介绍等

检索: 被《中文核心期刊要目总览》、《中国科学引文数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国科技论文与引文数据库》、《中国数字化期刊群》、SCOPUS等收录.



CN: 11-5847/TP

- Supervised by: CAS
- Sponsored by: CAS, NSFC
- Language: English
- Editor-in-Chief: MEI Hong

SCIENCE CHINA Information Sciences (Monthly)

SCIENCE CHINA Information Sciences (Sci China Inf Sci), cosponsored by the Chinese Academy of Sciences and the National Natural Science Foundation of China, and published by Science China Press, is committed to publishing high-quality, original results of both basic and applied research in all areas of information sciences, including computer science and technology; control science and engineering; information and communication engineering; microelectronics and solid state electronics, etc. Sci China Inf Sci is published monthly in both print and electronic forms.

Papers published in Sci China Inf Sci include: Review, Research Paper, Perspective, MOOP, Letter, etc.

It is indexed by Science Citation Index Expanded (SCIE), Engineering Index (EI), Journal Citation Reports/Science Edition (JCR), Academic OneFile, Astrophysics Data System (ADS), CSA, Cabells, Current Contents/Engineering, Computing and Technology, DBLP, Digital Mathematics Registry, Earthquake Engineering Abstracts, Engineered Materials Abstracts, Gale, Google, INSPEC, Mathematical Reviews, OCLC, ProQuest, SCOPUS, Summon by Serial Solutions, VINITI.



《中国科学: 信息科学》编辑部
地址: 北京东黄城根北街16号 (100717)
电话: 010-64015683 传真: 010-64016350
E-mail: informatics@scichina.org



《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

ISSN 1674-7267



9 771674 726220