

图4 心电测试示意图及受试者在进食后0.5小时和4.5小时时的胸前导联心电图

(图片来源:《European Journal of Clinical Pharmacology》)

5 基于生理电信号的评价工具助力未来食品研制

随着柔性电子皮肤、可穿戴传感器和深度学习算法的迭代,生理电信号在食品科学的应用正从单一走向多模态融合与自主高效化。未来,传统感官评价小组或不再是唯一标准。消费者佩戴轻便智能装置试吃时,大脑对风味的愉悦度、口腔对质地的力学反馈、心脏自主神经对功能成分的代谢反应、胃肠对营养素的排空节律,均将转化为高维客观数据实时同步云端。研发人员借此实现食品深度洞察。这一范式大

幅缩短开发周期、降低试错成本,有望在提升膳食健康与生命质量中发挥无可替代作用。

总体而言,脑电图解码了风味的神经中枢映射,肌电图刻画了质构的物理咀嚼动态,胃电图监测了营养的摄入与消化,而心电图评估了食物对生理节律的影响。生理电信号技术以人体为精密“传感器集群”,数字化改写感官与营养评价蓝图,不仅看清食物在口中消散的物理过程,更读懂食物与生命律动的生电对话。随着解码能力提升,未来每餐都将更精准、健康且富有情感共鸣。

利用物理特性实现存内计算

嵌入存储芯片的人工神经网络可实时、高精度重建人类大脑皮层

文/Xin Zheng¹, Ilia Valov^{1,2}

计算机预测物理过程,通常要先把物理规律写成数学方程,再通过数值近似计算一段时间内各变量的变化,并为不同特征赋予相应权重。计算模拟虽然能够逼真再现某种现象,但完成全部

计算所需的时间,往往长于现象本身的演化时间。若要重建人类大脑皮层表面,这种延迟尤其棘手。大脑皮层是布满褶皱的最外层神经组织,电脉冲以数十毫秒的时间尺度传递信息。在6806期《Science》中,Cai等将一种动力学学习模型集成到存内计算系统中,让数据直接在存储硬件内部接受处理,而不再在存储器与独

立处理器之间往返传输。该平台能以毫秒级延迟完成高保真计算,为临床成像、机器人和具身智能中的实时计算开辟了道路。

神经动力系统是一种利用人工神经网络规定“运动规律”、模拟表面如何随时间连续演化的计算框架。与残差神经网络等离散时间模型不同,后者只能在一系列时间点逐步更新状态,难以再现物理系统平滑的时间演化;神经动力系统则嵌入一个固定的、预先训练好的人工神经网络——其权重值储存在存储单元中——并调整每轮迭代的时间步,也就是每一步计算向前推进的时间长度,从而描述连续的动力学过程。

在数学上,这种连续框架可使系统状态沿流形表面平滑演化。例如,属0表面是没有贯穿孔洞、能够连续变形成球面的表面;在演化过程中,它不会出现撕裂、合并等拓扑变化。保持这种拓扑一致性,既有助于使模拟动力学符合真实物理规律,也能提高计算的保真度和可预测性。

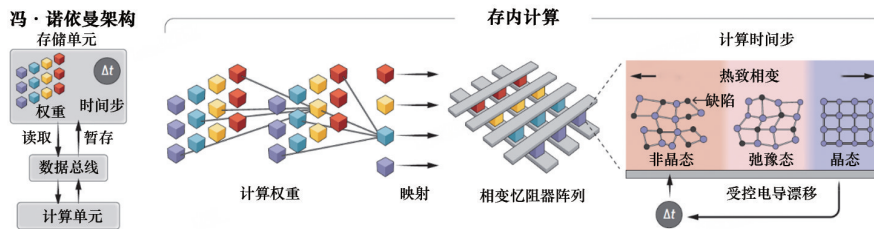
然而,在传统冯·诺依曼架构上运行神经动力系统,延迟往往达到数百毫秒。在这种架构中,存储单元与处理单元彼此分离,指令和数据必须通过数据总线来回传输。神经动力系统的自适应时间步迭代需要大量读取、临时存储、乘法和写入操作;嵌入式神经网络还要为不同数据赋予权重,而仅权重数据在存储单元与处理单元之间的传输,就约占总处理延迟的1/4。这些低效的数据搬运,使神经动力系统难以达到实时模拟所需的10 ms以下延迟。

1. 德国于利希,于利希研究中心 PGI-7 电子材料研究所

2. 保加利亚索菲亚,保加利亚科学院,电化学与能源系统研究所

让内存芯片兼任处理器

传统冯·诺依曼架构需要让数据在存储单元与计算单元之间来回传输,系统必须不断读取、暂存、计算和写回数据,因此会产生显著延迟。存内计算器件则能在数据所在的存储单元内直接处理权重、时间步等参数,使单次计算缩短至数毫秒,为实时模拟创造条件。



存内计算架构利用相变忆阻器阵列同时完成权重计算和时间步计算

(图片来源:《Science》)

Cai 等把神经动力系统集成进存内计算架构,使数据存储和计算都在同一存储阵列中完成。这就像不再把原奶运往工厂,而是在牧场就地加工:数据无须在存储器与处理器之间反复往返,从根本上减少了冯·诺依曼器件中数据搬运造成的延迟和能耗。

在多种存内计算器件中,忆阻器尤其具有潜力。忆阻器是一种电路元件,其电阻取决于此前施加电流的历史,并且在断电后仍能保持原有状态;受到电刺激时,它的电阻还可以可逆切换。忆阻器不仅能表示二进制的0和1,还能存储多个不同的电导状态。这些电导状态可直接代表突触权重,也就是嵌入式神经网络中2个人工神经元之间的连接强度,从而提高芯片的计算能力和存储密度。

不过,忆阻器也存在固有的不一致性:不同器件即使结构相同,对电刺激的响应也可能不同;同一器件经历多轮电脉冲后,响应也会发生变化。因此,要把以离散电导值编码的权重可靠写入器件并不容易。当物理模拟要求很高的计算精度时,这种器件间

差异和循环间波动尤其棘手。

为了实现实时、高保真的动力学模拟,Cai 等研制了一款基于相变忆阻器的全集成神经动力系统芯片。这类器件利用材料在晶态与非晶态之间的热致相变存储信息,能够精确调节多个电导等级。

相变忆阻器通常会发生电导漂移:写入的电导状态会随时间缓慢变化,使神经网络权重偏离初始设定值。Cai 等却把这一固有缺陷变成了计算资源。他们直接利用相变忆阻器电导漂移的物理动力学来确定自适应积分时间步,从而省去了额外搜索合适时间步的过程。通过控制电导漂移,芯片可以在本地连续、精确地调节时间步。

Cai 等设计的芯片可将每个时间步允许的最大数值积分误差控制在 10^{-7} , 单次计算延迟仅为 2.12 ms。与此前的神经动力系统相比,其计算速度提高至 4~36 倍,功耗降至原来的 1/12~1/25。在端到端的大脑皮层表面重构任务中,在论文报告的误差容限和网格分辨率设置下,该器件的延迟仅为商用 NVIDIA A100 图形处理器的 1/50~1/470,同时仍能保

持属 0 拓扑,并减少几何冲突造成的伪影。

这项研究体现了利用物质自身物理特性开展计算的一次观念转变。Cai 等把相变忆阻器的电导漂移重新定义为可编程的计算资源,说明器件内在的“非理想”物理特性未必只能被当作缺陷压制,也可以主动加以利用。

这一思路并不局限于相变忆阻器,它还促使人们重新审视其他新兴器件中那些过去被视为瑕疵、却可能具有计算价值的特性。例如,电化学忆阻器中的随机开关动力学——即电阻状态具有不可预测性——以及导电丝演化——即离子迁移产生的缺陷使导电通路发生变化——传统上都被视为噪声来源,但也可能用于生成计算所需的真随机数。这样的观念转变,或将推动计算技术直接利用电导等物理参数实现高精度运算,而不是在数字电路中对这些参数作近似表示。

仍待回答的问题包括:可靠的多级电导编程能否扩展到更高比特深度,使每个存储单元容纳更多状态;受控电导漂移方案在更宽的温度范围内能否保持稳定;以及器件长时间运行时,数值方法能够在多大程度上容忍电导漂移带来的累积误差。尽管如此,Cai 等实现的大幅降延迟,已经为保持拓扑结构的神经动力学计算确立了一种新的硬件范式。未来,该技术有望在神经外科手术中实时追踪大脑皮层表面,并进一步融入临床决策。

(译自《Science》,2026,393(6806))

(科技新闻栏目编辑 黄文光)