# 启迪新一代电子纺织品的新兴人工智能技术

**Frances Cleary[1,2], Witawas Srisa-An[3], David C. Henshall.[1] 和 Sasitharan Balasubramaniam [3]**

[1]爱尔兰都柏林皇家外科医学院医药与健康科学学院生理学与医学物理学系[2]爱尔兰沃特福德东南科技大学沃尔顿研究所[3]美国林肯内布拉斯加大学计算机学院

**摘要** 智能纺织品和可穿戴设备行业正着眼于推动技术进步，以满足快速发展的纺织业对行业、消费者以及新兴创新纺织品应用的需求。与此同时，以人脑神经运作机制为灵感，推动着新一代人工智能的发展。受人工智能启发的硬件（神经形态计算）和模拟神经网络及人体神经系统处理能力与特性的软件模块正在逐步成形。纺织行业需要积极关注这类新兴技术，从其运作机制和处理方法中汲取灵感，以促进电子纺织品领域嵌入式智能的创新发展。新一代人工智能正在迅速引起各行各业的关注（纺织、医疗、汽车、航空航天、军事）。它有望借助尺寸小、重量轻且处理能力强的技术，催生创新应用。这些特性满足了对性能更优的集成电路（IC）和复杂机器学习算法的需求。我们需要探讨这些特性如何启发并推动电子纺织品领域的发展。本文将介绍电子纺织品领域当前的纳米技术与人工智能进展，随后重点探讨神经形态计算和受脉冲神经网络启发的人工智能技术在纺织行业中的潜在应用，以及未来愿景与发展方向。我们将考察人工神经网络、神经形态计算（二维和三维结构）的核心架构要素，并探讨这类受神经科学启发的技术如何影响并推动电子纺织品领域的变革与新研究进展。

**关键词** 人工智能、电子纺织品、神经网络、神经形态计算。

## 一、引言

智能服装传统上是指能够启用或禁用某项功能的服装，例如监测穿着者的身体状况[5]，；而电子纺织品则为服装或织物增添了一层智能，例如连接外围设备或嵌入式电子设备，从而为穿着者带来额外价值。人们预计，采用具备计算和记忆能力的嵌入式智能电子纺织品的智能服装，将成为物联网领域下一个重要的市场驱动力。对实用型可穿戴技术的需求持续增长，预计市场将推动电子纺织品发展，其市场规模预测将从*29.81*亿美元（*2022*年）达到 *85.081* 亿美元（*2028*年），据 *Absolute Reports* 称。多年来，智能纺织品经历了三代演变：(1) 第一代智能纺织品：电子技术与纺织品之间的集成度较低；(2) 第二代智能纺织品：通过调整传统纺织品制造方法，增加了额外功能。例如，将导电线缝入纺织品中；(3) 第三代将电子传感功能集成到纺织材料中。下一代电子纺织品和智能服装会是什么样子？信息与通信技术（人工智能）与纳米技术（纳米纺织品和可穿戴传感纳米材料）的融合，是推动下一代更智能、更

先进电子纺织品发展的关键驱动力，并推动人工智能启发的计算织物。快速发展的信息与通信技术，例如人工智能脉冲神经网络（SNN）和神经形态计算等核心技术，其计算能力及架构结构有望为这一领域激发全新创新。

纺织行业的数字化转型主要发生在纺织制造流程和生产环节，人工智能技术正被用于生产线上的织物检验和缺陷检测，从而提升输出质量 [3] [4]。[14] 概述了符合工业4.0倡议、实现自动化织物缺陷检测的前沿技术干预措施，详细介绍了传统方法（统计方法、结构方法、基于模型的方法）以及基于学习的方法（机器学习或深度学习）。[13], 总结了纺织行业采用和运用的智能聚类与分类技术，重点介绍了支持生产规划、织物故障检测、性能评估和预测模型的监督学习与无监督学习。在本文中，我们将更深入地探讨人工智能信息通信技术的发展，特别关注神经形态计算和脉冲神经网络人工智能，评估其架构、愿景、能力，以及这些要素如何启发电子纺织品领域未来的研究进展。医疗保健正成为关键领域之一，电子纺织品和人工智能（AI）的新进展推动了嵌入式纺织智能与体上计算的发展；这些技术在不久的将来可应用于医院等临床环境，也可支持患者在家中舒适地接受更完善的远程监测。[37] 详细介绍了一款智能服装 *MyWear* ，它能够监测并采集生理数据（肌肉活动、压力水平和心率变化），在云端处理数据，并根据检测到的异常情况向用户提供预测。利用这些人工智能技术的电子纺织品应用和服务，可为癌症护理、心血管疾病和神经系统疾病等不同健康状况带来更有效的实时监测与分析；一旦发现严重健康问题，还可及时进行早期干预。“智能服装互联网”[12] 推动智能服装的相互通信、与环境物体的交互，以及如何主动与远程服务器通信以提供先进服务等方面不断突破。下一代智能服装和电子纺织品将嵌入比以往更智能的技术层，因此需要具备更灵活、模块化、集成化、无缝且易用的功能，以满足最终用户的需求。

本文其余部分安排如下：第 2 节概述纳米技术和纳米材料的进展。第 3 节详细介绍目前正在影响纺织行业的人工智能技术，并重点说明在数据流通信和流程方法方面需要考虑的四项核心技术属性。第 4 节讨论脉冲神经网络的核心架构属性，第 5 节讨论神经形态计算的核心架构属性，旨在引发思考：如何从这些要素中汲取灵感，并将其积极融入下一代电子纺织品。

## II. 纳米技术纺织品研究进展

将电子技术融入纺织品的纳米技术织物，正推动交互式智能服装迈入令人振奋的新阶段 [39][38]。纳米技术通过操控单个原子和分子，制造纳米级机器，为众多领域的各种应用开辟了可能性（《传感器》、液体防护、传感器显示技术、气味控制、织物强度、抗皱）。[9] 重点介绍了可穿戴存储器与计算设备（WMCs）的优势，以及纳米技术和材料科学的最新进展。WMC 与人脑之间的联系有望实现快速运行和复杂的接口，并直接映射生物系统所具有的连续状态。

微型传感器技术和纳米材料的进步，正为我们穿着和主动使用服装的方式带来全新且颠覆性的创新。纳米材料促成了纺织品、电子技术与信息处理的新一代融合 [图 1]。这种结合或混合方法为整合新功能打开了大门，例如抗菌性能或生物功能。纳米材料可在纤维生产阶段添加，也可在后整理阶段施加于纤维表面。其目的是利用纳米材料提升灵活性和实用性，同时让服装更时尚。纳米材料包含多种材料，例如石墨烯、碳纳米管、聚合物、介电弹性体和复合材料。纳米材料受到不同刺激时会产生各异的特性行为，进而可用于多种应用，尤其是医疗保健领域的患者护理应用。利用纳米材料的生物传感器融合了多个学科，包括分子工程、材料科学、生物技术和化学，能够以高灵敏度识别各种疾病生物标志物，助力早期检测[40]。

2004年，研究人员成功分离出石墨烯薄片（剥离石墨烯）。这种二维材料由排列成六边形晶格的碳原子构成。它是世界上已知最薄的材料（仅厚一个原子），并且

为智能服装和电子纺织品的设计与开发带来了诸多可能。石墨烯质轻，弹性和导电性更强，并有望取代合成纤维（聚酯纤维、尼龙）。通过石墨烯纤维，可将化学传感特性引入纺织品材料中。*Cutecircuit*（*https://cutecircuit.com*）制作了一款含有石墨烯的黑色连衣裙。这款连衣裙能够随着穿戴者的呼吸同步变色。其实现方式是使用微型LED灯，并以石墨烯为灯供电，同时将其用作传感器来记录穿戴者的呼吸。石墨烯基复合材料也被用于3D打印技术，以探索开发高弹性、高灵敏度应变传感器。此类应用可用于呼吸模式监测和测量 [41]。

纳米颗粒正逐渐成为诊断传感器。纳米尺度的纺织技术进步，推动纺织品功能与性能提升，开启了一个新时代，例如增强通信能力、赋予纺织品抗菌和感测能力，或提升吸湿性。通过使用导电纤维/纱线和刺绣技术，可借助易于集成的纺织天线实现服装通信，并构建互联的集成式可穿戴纺织系统。该领域的研究一直积极探索材料特性（柔性、导电性、重量），推动了纳米工程功能纺织品的出现，并通过在织物中添加纳米颗粒来提升纺织品的性能与功能。（Ghadremani 等人，2016）详细介绍了添加银纳米颗粒以改善纺织品静电特性的做法。（Liu 等人，2010）指出，在袜类服装中添加 Ag（银）纳米颗粒，可抑制真菌和细菌的滋生，从而减少脚部异味和瘙痒。类皮肤纳米材料可穿戴传感器、柔性电子基底是产业界的重点研发方向。电子纺织品领域一直在尝试模拟人类皮肤的柔性和可拉伸性。智能皮肤的相关研发案例包括

- (Tianzhao Bu等人)开发了一种可拉伸的摩擦电光子皮肤，可实现多维触觉感知和手势传感。
- (Liu等人)完成了一篇关于皮肤实验室的综述，重点介绍用于可穿戴健康监测的柔性和可拉伸电子技术。
- (Yang等人)提出了一种嵌入硅胶中的新型结构化纤维传感器，可在智能皮肤中精确测量低压。

此类纳米技术、纳米材料和智能皮肤方面的进展，正受到学术研究界和企业的广泛关注，因为人们看到了其经济影响，以及正在涌现的、前景广阔的最终用户商业应用。与此同时，新一代人工智能领域正涌现出脉冲神经网络（SNN）和神经形态计算；毫无疑问，这些发展未来将推动研究方向聚焦于纳米技术与人工智能驱动的嵌入式电子纺织品的融合创新。本文其余部分将进一步探讨人工智能（脉冲神经网络）和神经形态工程技术，梳理并强调纺织品及智能服装研究与创新领域今后需要进一步考虑的关键架构方面。

## III. 人工智能对纺织行业的影响

电子纺织品研究领域的专家、供应商和制造商开始深入探究人工智能和机器学习技术对不同领域可能产生的影响[6]。人工智能的应用正通过构建更可持续的数字供应链，以及优化智能纺织制造（生产规划和运营流程管理），直至织物缺陷识别[2], 图案检测分析等环节，推动纺织业的数字化转型。(Chaudhari等人)介绍了人工神经网络（ANN）在织物工程中的应用，重点探讨其在纺织领域的应用，以支持织物分类、织物褶皱识别、织物图案自动识别和织物舒适性评估。如何利用这些增强型智能技术推动纺织业迈向可持续的循环经济，是当务之急，也日益受到广泛关注。纺织面料设计软件也开始采用并使用基于人工智能的软件工具，应用于图案设计、制作和裁剪，并提供更先进的工具，内置 3D 可视化功能[1]。

在基于织物的纺织品中采用和使用人工智能，需要遵循结构化、系统化的流程，同时考虑重要的技术属性以及终端用户功能与形态因素（Giuseppe等人）[13]。在考虑将先进人工智能技术带来的启发应用于基于织物的环境时，需要考虑以下电子纺织品嵌入式功能的关键技术属性：

- 基于织物的纺织品计算考量（数据采集和数据处理）
- 适用于基于织物环境的监测与测量能力和技术。
- 合适的通信方法和技术。
- 纺织品驱动智能相关的能源考量。

所有这些要素都与数据流通信和处理方法直接相关。本文将在第 4 节和第 5 节中采用这些要素，以便将新兴人工智能技术的特性映射到纺织品领域。目前，在医疗保健领域，这类技术功能特性通过面向患者、基于服装的智能电子纺织品可穿戴设备得到应用和展示[19]。在设计与开发中纳入此类考量，能够收集人体健康监测

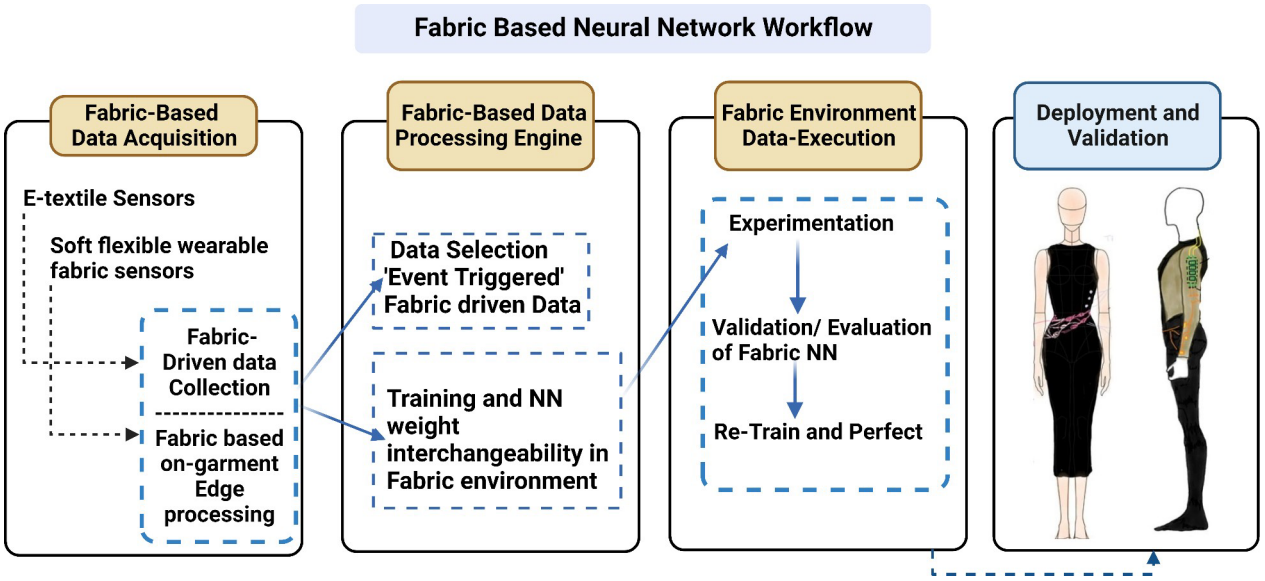


图 2. 基于织物的神经网络工作流。

相关数据集，例如通过可穿戴服装中的基于纺织品的传感器采集的肌电图（EMG）或心电图（EKG）数据集。这类用于采集数据的服装和纺织品需要能够适应用户的需求，在不同使用场景下都便于使用。通过主动采集这些数据集，便可传输、处理并提取关键分析结果，从而有效支持决策，而智能算法的开发与实施为此提供了助力。采用基于人工智能的算法和技术，开启了智能纺织品的新时代，使其能够在动态变化的医疗监测环境中利用实时、准确的数据知识。考虑在纺织环境中应用此类嵌入式人工智能时，还需要审视当前人工智能形式化方法的现状，以及如何推进这些方法以适应需求。随着该领域技术不断进步和涌现，一系列关键挑战与问题亟待进一步调查和研究。

在拓展导电线的应用边界，并嵌入智能可穿戴技术与功能方面，[48] 他们成功尝试将数据存储在织物中。这是通过导电线的磁性实现的，并由此支持了诸如利用衣物存储密码的应用：只需用衣袖上存有密码的部位刷过门锁，即可开门进入建筑物。

我们必须思考，未来基于织物的人工智能算法会是什么样子，以及如何开发这些算法，并将其有效集成到织物和纤维环境的核心之中。未来不仅会出现新型织物人工智能设计与制造方式，还可能涌现完全由织物驱动的数据采集和数据处理方法，并采用或借鉴新的人工智能最佳实践、标准和方法。实施基于织物的人工智能算法时，需要考虑的关键特性包括速度（响应时间）、处理能力、复杂度／尺寸以及学习能力。[图2] 概述了纺织品驱动的人工智能工作流中需要考量的关键组成部分，以支持基于织物的数据采集、数据处理、基于织物的引擎、在织物环境中执行以及部署。

人们对将人工智能技术应用于智能可穿戴服装和智能服装互联网的研究兴趣日益浓厚。研究者正在探讨如何将此类人工智能嵌入织物环境的核心，使人工智能应用无缝融入其中，并做到人眼不可见。[6] 全面回顾了智能纺织品集成微电子系统的进展，并着重介绍了两项重要的核心特性：1）灵活性，使其能够有效贴合人体等三维曲面；2）纺织品的结构转变，从而降低纤维应变并延长织物生命周期。[11] 描绘了从纤维器件迈向织物计算机的愿景：织物纤维具备感知、存储、处理和供电能力，从而构建基于织物的计算环境。如此强大的基于织物纤维的处理能力，使基于织物的程序得以运行，能够激活纤维传感器，并在织物计算机中处理和存储数据。目前，人们一直在开发这类新型纤维，特别关注采用热拉伸、熔融纺丝和涂层等可扩展工艺，制备能够容纳并实现计算功能的纤维结构[7][8][10]。研究人员也在探索纤维数字化制造方法，使其具备内置功能.....

.....包括纤维内存储程序、数据存储、传感器和数字通信[11], 。这种结构化制造工艺旨在将离散的电子器件均匀地嵌入纤维内部，以实现相应功能。研究人员正积极跳出固有思维，探索将人工智能与电子纺织品融合的创新方式，这些方式有望带来颠覆性变革，并突破我们熟知的传统纺织品领域。这重新激发了人们对这一领域的兴趣，也展现出其在多个行业产生实际影响的潜力。

## IV. 脉冲神经网络的属性

人工神经网络领域正涌现出新型脉冲神经网络（SNN）技术。这些技术利用电子元件模拟功能，复现并模仿人脑中神经元、突触和神经网络的生物运行机制。SNN 的核心架构属性包括

- 神经元在达到设定阈值后发放脉冲。
- 神经网络通过改变突触权重来完成学习。随机权重变化算法是学习阶段采用最广泛且最简单的算法之一。对于该算法，正确的输出是已知的，并根据需要增大或减小误差。
- 所得结果取决于神经元的脉冲活动以及神经元节点输入。

[15] 详细阐释单神经元层面，并给出一维神经元模型示例，例如漏积分发放模型（LIF） [16],、脉冲响应模型（SRM）[17] ，以及更复杂且符合生物学特征的人工神经元模型，例如 Hodgkin-Huxley模型[18]。现在，我们将评估此类 SNN 的核心计算、监测/测量、通信和能耗，并重点介绍受人脑启发的结构与处理范式，以及它们为电子纺织品领域带来的潜力。[图 2] 详细展示了这种数据流通信与处理技术方法在电子纺织品领域的应用，突出介绍了与基于织物的人工智能（神经网络）智能电子纺织品可穿戴设备的实施、验证和部署相关的织物工作流程。

### *A.* 支持织物驱动数据采集与处理的脉冲神经网络计算要素

数据采集是指获取数据并进行分析以解读数据的方法和过程。这涉及运用各种技术和工具对数据进行采样，将数据转换为可用于进一步分析和处理的格式。从神经网络的角度来看，我们现在将进一步探讨主要的计算元素，重点介绍在织物环境中需要考虑的重要架构方面：1）人工织物神经元 2）人工织物突触 3）人工织物神经网络，这些都是进行数据采集和处理所必需的，并具有应用于织物环境的潜力。

#### 1) 电子纺织品人工织物神经元

神经元是神经网络的核心构建单元。神经元的工作机制包括由权重表示的突触、阈值以及一个输出脉冲，而该脉冲会反过来重置神经元。每个神经元都有膜电位。膜电位相当于电压，当电压超过设定的阈值时，就会发出一个脉冲（或动作电位），因此，生成的脉冲就是脉冲神经网络中一个神经元与另一个神经元通信的方式。基于这些特性，我们如何开始构想一种织物神经元，既能复现单个神经元的功能，又具备扩展能力，可在织物环境中实现多个互连的神经节点？为实现这一目标，我们必须深入探讨目前已定义的人工电子神经元模型，以及这些模型如何启发未来基于织物的神经元实现。本文将探讨漏积分发放模型和 Hodgkin-Huxley模型。虽然这些模型还存在进一步改进方案，也有其他模型，但这超出了本文的讨论范围。漏积分发放模型（*LIF*）：最简单的神经元模型是一种基于如下逻辑的漏积分发放神经元人工电子电路：如果脉冲（驱动电流）超过设定的阈值，神经元就会发出自身的脉冲并重置。该模型基于电阻器和电容器（RC电路）[图3]运行。LIF模型的局限性在于，它不会记忆脉冲

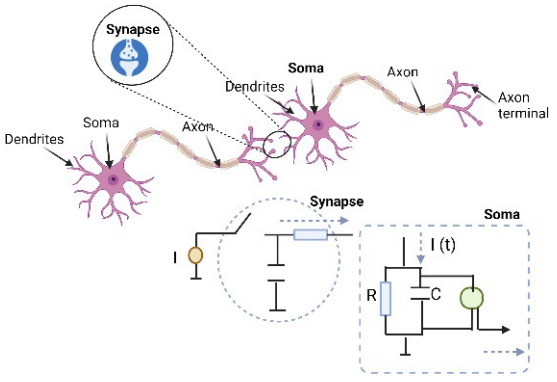


**图 3.** 简单积分发放人工（RC）神经元节点

每次脉冲后膜电位重置，因此活动得以保留。我们需要考虑如何利用漏积分发放神经元模型，在织物环境中复现此类漏积分发放模型，以产生事件驱动脉冲神经元。可使用导电线（通过曲折缝纫机针法制作）制备柔性织物基电阻器，而围绕纺织基电容器开发的研究也在持续积极开展[20]。[51] 研究用于提高平面型和夹层型纺织电容器电容的方-

法，采用混合导电纱线和导电纺织品。实验研究也一直在持续开展，致力于开发可穿戴织物大脑，借鉴脉冲神经网络架构技术和漏积分发放模型，实现基于服装边缘的传感器数据处理 [56]。此类进展将为开发基于RC电路和漏积分发放模型的功能性织物基神经节点开辟选择与新方法；该节点能够处理由“事件”脉冲驱动的活动，复现神经元节点，并可扩展为基本可工作的事件驱动脉冲神经网络。

还需要额外嵌入由晶体管门控的电路，以实现膜电位的阈值水平 *Vth*；当达到该阈值时，就会产生动作电位尖峰。 [22] 详细介绍了一种在柔性薄膜上实现的有机场效应晶体管，该薄膜在组装完成后可应用于纺织品。[23] 展示了完全采用喷墨打印的二维材料有源异质结构，其中使用了石墨烯和六方氮化硼（h-BN）油墨，用于在纺织品上制造可喷墨打印、柔性且可水洗的场效应晶体管。纺织品基 FET 的这些进展带来了集成纺织品阈值电平门的能力，从而可以为织物脉冲神经网络中的不同神经节点设置不同的阈值水平。

*Hodgkin* 和 *Huxley* 神经元模型是一种更复杂的模型，用于复现神经元节点动作电位的生成过程。该模型可以通过微分方程描述膜电位以及钾（K）和钠（Na）通道电流随时间的变化[图 4。他们成功观察到了动作电位的生成以及不应期 [21]。在此电路中，电容器代表细胞膜；电路包含可变电阻器，分别代表电压依赖性 K+ 和 Na+ 电导，此外还有一个固定电阻器，代表电压非依赖性漏电导。该模型包含三个电源电池，用于提供相应电导的反转电位。要在织物环境中构建该模型，需要纺织电阻器和电容器，还需要通过导电线互连一个可变电阻器。迄今为止，纺织品可变电阻器已被制成织物电位器。这类织物电位器包含导电滑片和电阻轨道，轨道两端设有测量点。通过调节滑动滑片，导电滑片可用于设定和测量可变电阻。[49] 详细介绍并演示一种基于拉链的电位器。还可考虑使用其他可变电阻元件来制作此类可变电阻器，包括 Eeonyx弹性可变电阻传感器织物（*Adafruit*），它可用于制作所需的可移动、可适应的柔性传感器。这类采用可拉伸导电织物的弹性织物传感器，在受到应力时电阻会发生变化。关于如何利用纺织品和织物基可变电阻，并将其应用于织物神经元节点的设计，还需要进一步研究。

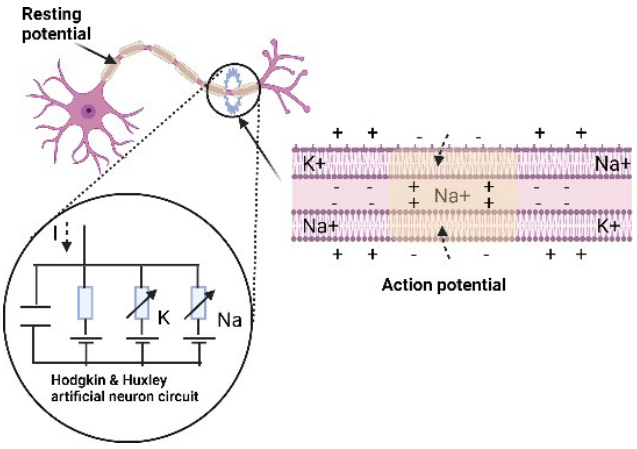


**图 4。** Hodgkin 和 Huxley 电子人工神经 node

用于创建织物基 Hodgkin 神经节点的关键纺织组件已经具备；从设计角度来看，如何将这些元件组合起来以形成可工作的神经元节点，是实现可工作的 Hodgkin 和 Huxley 神经节点的关键挑战。

2）电子纺织品人工织物突触

当前脉冲神经网络中的学习取决于改变和交换神经网络各节点突触权重的能力。当达到神经元阈值时，神经元会触发并产生动作电位。这是兴奋性电位和抑制性电位之和的结果，而这些电位通过突触连接到神经元。我们将突触称为突触权重，即神经网络中两个节点之间连接的强度。[25] 关注彼此相距较远的非静态神经网络，以及如何通过实施源自波分复用可见光通信的全光突触来实现实时权重调整。[52] 研究了涂覆还原氧化石墨烯（RGO）的纱线，以制造适用于可穿戴神经形态计算系统的基于两端忆阻器的人工突触。[53] 研究了一维有机人工多突触的设计与开发，该多突触由制作在银（*Ag*）导线上的铁电有机晶体管组成，可实现用于可穿戴神经形态应用的电子纺织品神经网络。

要在织物环境中复现脉冲神经网络（SNN），我们需要考虑突触所需的功能，以及如何以可行的方式将其嵌入织物环境中。由于权重会影响神经元的激发，在脉冲神经网络中，从基础层面来看，可以通过嵌入一种选项来实现复现，使其能够在织物环境中从一种

**表 1. 与脉冲神经网络最相关的神经网络类型**

| 脉冲神经网络类型 | 数据流 | 记忆 | 预测 | 权重 |
|---|---|---|---|---|
| 前馈 | 输入到输出 | 无记忆 | 较差 | 权重矩阵 | 输入，产生输出 |
| 循环 | 循环信息周期 | Has 记忆学习 | Good | 权重施加的电流 and 上一个输入 |

导电线基电阻器切换并连接到另一种导电线电阻器。这类纺织电阻器进而可用作突触织物基权重。随着忆阻器作为突触权重的引入，相关技术也在不断发展；从织物突触实现的角度来看，这些内容值得关注，将在第 5 节“神经形态计算特性”中介绍。

### 3）电子纺织品人工织物脉冲神经网络

神经网络有多种类型，包括感知器、多层感知器、前馈网络、循环网络、全连接网络、卷积网络、径向基函数网络、长短期记忆网络（LSTM）、序列到序列模型和模块化神经网络。表 1 概述了前馈神经网络和循环神经网络的特性；在选择并使某种脉冲神经网络类型符合 [42][43][44] 时，这些特性具有参考价值。在织物环境中设计嵌入式神经网络时，需要考虑织物和最终用户的关键属性，包括美观性、耐久性、舒适度和维护需求。根据脉冲神经网络的整体规模及其包含的隐藏层数量，可以确定所需的纺织人工神经元节点、突触互连和互连织物多层结构的数量。

接下来，我们可以着手研究如何适应织物环境并将其嵌入其中，从而找到最佳的设计、布局和功能集成方法。

## *B.* 脉冲神经网络监测/测量

脉冲神经网络（SNN）可以通过监督学习进行学习：在这种学习方式中，有一个输入变量和一个输出变量，神经网络内部的算法计算会从训练数据集中学习；当达到可接受的性能水平后，学习便会停止。相比之下，无监督方法具有输入变量，但没有用于支持神经网络训练和学习的输出变量。 [24] 概述了脉冲神经网络（SNN）的各种训练方法，例如传统深度网络、约束训练、脉冲反向传播变体以及脉冲时序依赖可塑性（STDP）的变体，以便对脉冲神经网络（SNN）的训练方法进行分类，同时强调其优点和缺点。在织物电子纺织品中创建这样的训练或学习过程，是一项迄今尚未实现的挑战。

采用纳米技术显然是尝试将这种学习要素嵌入智能织物服装的首选初始方法。

脉冲神经网络的结构决定了其分类。本文将重点讨论全连接多层神经网络。此类多层脉冲神经网络由多个人工神经元节点层组成（通常有三层或更多层，并采用非线性激活函数）。从设计角度来看，在织物环境中，一旦确定了实现可运行神经元节点所需的核心纺织组件，以及用于灵活更换突触权重的有效方法，下一步便是探索最实用、可行的织物驱动设计，以便整合多层结构及其互连，并确保能够在执行阶段对其进行验证和修改。

多层织物经机织并堆叠后形成多层织物，并通过第三维（Z 方向）上的连接纱线固定在一起。这类机织制造技术，以及分层和交织织物的处理方式，都是设计方案，需要加以评估，以确定适用于开发脉冲神经网络产业用纺织品的设计及最佳实践 [图 5]。在织物中编织多层结构，为在嵌入式织物环境中嵌入神经网络节点和互连神经网络创造了机会。目前，最佳方案、最佳方法，以及核心组件及其可重复使用性仍在研究之中；但随着纺织组件、智能技术和纳米技术不断发展，新的机遇正在涌现，推动我们迈向织物人工智能驱动智能这一愿景。第 5 节将进一步探讨二维／三维堆叠分层技术，并借鉴神经形态计算及其相关进展。

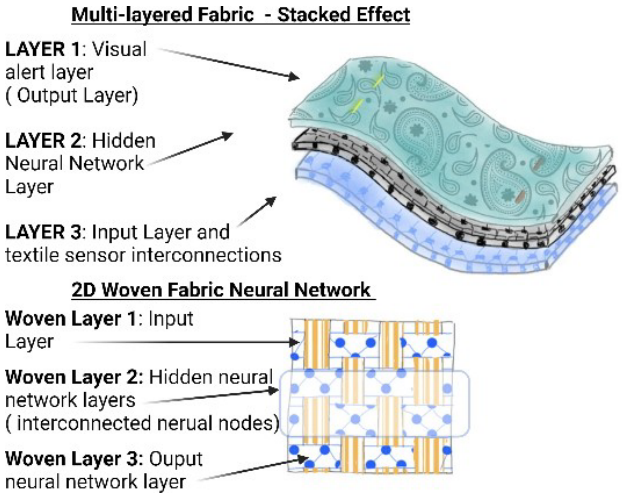


**图5。** 受堆叠神经网络启发的多层概念设计方法

**表 2. 神经元信息编码类型**

| 编码类型 | 详细信息 |
| --- | --- |
| 频率编码 | 在固定时间间隔内的脉冲频率。可用于单神经元层面或进行解读——tation 脉冲序列。 |
| 二进制编码 | 一个神经元在设定的时间间隔内处于活跃或非活跃状态。它会发放 1 个或多个脉冲在该时间范围内。 |
| 首次脉冲时间编码 | 该方法用于编码信息以实现快速响应（以毫秒计）。它基于首脉冲模式）。 |
| 完全时间编码 | 所生成全部脉冲的精确时序是编码的一部分。时序重要。 |
| 相位编码 | 将输入转换为二进制表示—形式（例如，“1”表示生成一个脉冲—出）。通过为每个表示的比特分配不同的权重来添加信息在阶段中 |
| 簇发编码 | 一串脉冲爆发（短促且频率高的脉冲序列）。评估一次爆发中脉冲模式的数量编码 |
| 延迟编码 | 脉冲数量并非首要因素，相反，事件发生与首次脉冲触发之间的时间至关重要。刺激根据排名顺序进行编码，其中一组神经元按顺序产生它们的第一个脉冲 |

### *C.* 脉冲神经网络通信

脉冲神经网络推动了类脑计算的应用，不仅能够快速处理数据，还能进行大量事件驱动数据处理。脉冲神经网络中的神经计算与通信通过脉冲的产生来定义，使神经元能够借助这些触发脉冲彼此通信。目前，关于神经元信息编码类型的研究仍在进行。[29] 总结了脉冲神经网络的信号编码方案。神经元编码与解码是一种信息与通信过程，例如，外部变量或刺激会触发大脑中的神经活动。此类刺激（如触觉刺激）会在大脑中产生不同的神经活动模式。[27] 概述了突发神经编码及其分析的新方法。[28] 介绍了采用时间编码和脉冲的脉冲自编码器；这些自编码器通过反向传播进行训练，能够从紧凑的表示中高保真地存储和重建图像。

对脉冲序列模式进行分类并理解其含义，可实现对该模式的主动解码。一个例子是通过将脉冲序列模式与模板主动匹配，对脉冲序列进行分类。此类模板可以代表一个预设的词语、含义或结果。在电子纺织品领域，神经信息的编码、解码以及潜在织物脉冲神经网络分类模板的创建与验证，可将外部感测映射到与基于织物的神经网络相连的嵌入式纺织传感器，从而实现基于织物的脉冲神经网络编码的通信与处理。此类织物脉冲神经网络分类模板可对应于警报通知，提醒人们注意某种关键健康监测情境；在这种情况下，此类模板可与脉冲神经网络织物智能服装配合使用，以评估健康状态，并根据此类分类模板的使用情况，在需要时向穿戴者发出警报并提供反馈。脉冲神经网络的基本运行机制，核心在于网络节点如何互连，以及信息如何流动、节点间如何实现通信。人工神经网络有多种类型。[26] 对脉冲神经网络中的神经编码进行了比较概述，并详细介绍了频率编码、首脉冲时间编码（TTFS）、相位编码和簇发编码。表 2 列出了迄今为止用于参考的多种神经元信息编码技术，并重点指出了在探究由织物驱动的脉冲神经网络神经元编码与解码潜力时需要考虑的关键要素。

### *D.* 脉冲神经网络能耗考量

脉冲神经网络有望提升能效。由于 SNN 是一种动态系统，因此更适合由动态驱动的过程和应用。目前正在持续研究如何有效减少突触运算，从而降低神经网络的计算性能需求。[50] 通过混合训练策略，重点优化 SNN 在神经形态应用中的能耗，同时考虑网络计算所产生的能耗。从结构和架构角度来看，SNN 通常比更传统的人工神经网络拥有更少的神经节点；此外，SNN 还可以实施“节点连接剪枝”[图 6]，以降低处理能力需求，并改善 SNN 的整体工作功能和能效。[30] 通过利用神经元的

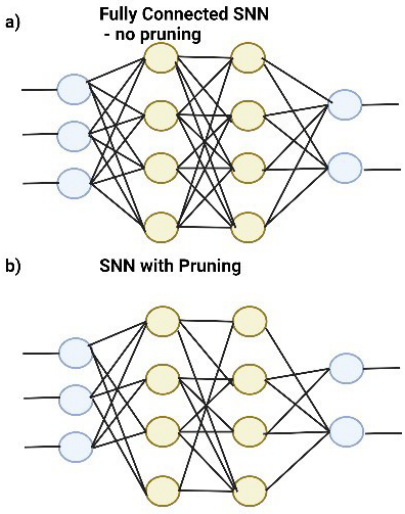


**图 6.** 脉冲神经网络中不进行剪枝与进行剪枝的差异

输出脉冲特性，开发了一种可在网络训练期间应用于 SNN 的剪枝方法。[31] 详细介绍了在训练过程中定期对基于 STDP 的连接进行剪枝，以及对关键突触的权重进行量化的过程。他们验证了 *90.1* %的分类准确率，并展示了能效提升。在纺织环境中实现 SNN 时，需要考虑断开和重新连接织物神经节点的能力，以便能够以高效方式对 Fabric SNN 进行剪枝，从而增强织物 SNN 的能效运行功能。从计算角度来看，SNN 由于神经元发送脉冲而具备更快运行的能力。由于 SNN 采用时间信息检索，这会提升整体处理时间和生产力，因此最终对 SNN 的能耗产生非常积极的影响。

## V. 神经形态计算属性

神经形态计算的概念起源于20世纪80年代。它汲取了计算机科学、数学以及神经网络仿生模型等领域的灵感。这一新兴的跨学科研究领域有望颠覆传统计算方法和架构实现，推动形成更集中、融合记忆与计算的处理方式，摆脱冯·诺依曼架构中记忆与计算能力彼此分离、且对计算能力要求较高的模式。人脑的运作方式为此提供了灵感，开辟了设计新型、更具容错能力的分层并行架构与布局的道路。

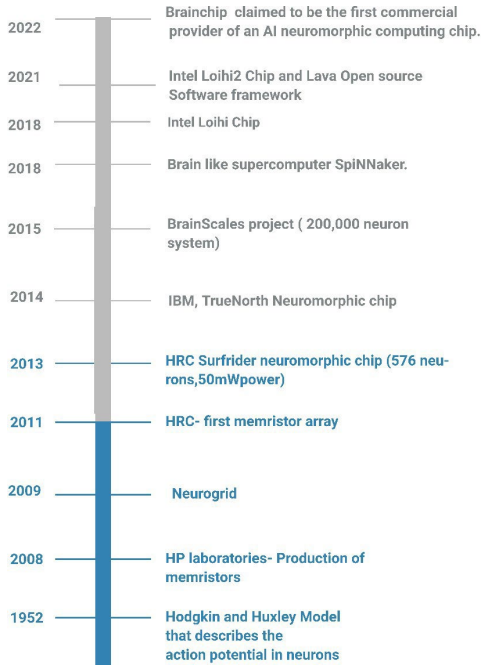


**图 7.** 神经形态计算技术进展时间线

为了了解神经形态计算的哪些方面能够启发下一代智能电子纺织品和服装端边缘智能的创新发展，我们将首先重点介绍神经形态计算中重要的核心架构要素，并评估其在电子纺织品领域的应用潜力。神经形态计算的核心架构基于这样一种理念：通过由突触和神经元所代表的简单处理结构产生的事件驱动脉冲进行通信。目前的研究正利用互补金属氧化物半导体（CMOS）技术，推动相关产品的研发，从而开发神经形态脉冲神经网络硬件实现方案 [45][46][47]。尺寸、重量、低功耗和模块化设计（可扩展性）等关键特性主导着相关技术的研究重点。多年来，CMOS 技术的进步推动了更小、更节能且具备量产能力的系统的发展。这类技术与先进的机器学习技术相结合，直接推动了硅基神经元的模拟与实现，这也被称为神经形态计算。

[图 7] 重点展示了各项进展，其中 *Brainchip* (https://brainchip.com/) 于2022年宣布，声称自己是全球首家商业化神经形态人工智能处理器“*Akida*”的生产商。该处理器能够模拟人脑的运行方式，以高精度和高能效处理数据。Akida 是一款事件驱动型人工智能神经处理器，包含*120* 万个神经元和 *100* 亿个突触。

### *A.* 神经形态计算运算

#### 1) 交叉开关阵列架构属性

随着神经形态计算逐渐摆脱传统的冯·诺依曼架构，转向更专注于存内计算的架构，处理过程在存储功能元件内部进行，从而减少数据传输所需的时间和能耗。硬件架构设计需要考虑：1）神经节点之间的突触互连；2）如何实现这些互连，从而构建一个全连接神经网络。从硬件设计的角度来看，神经形态计算采用了交叉开关阵列架构，以实现满足神经网络结构要求所需的完整互连。交叉开关阵列架构包含若干行（字线）和列（位线），存储器件互连于行列之间。通过开发称为忆阻器的电阻式存储器件（一个晶体管与一个电阻器的组合），相关技术取得了进展。交叉开关阵列的运行机制是向选定的行输入电流（电压脉冲），进而通过电压脉冲激活选定的列，具体取决于交叉开关阵列中各单元的激活情况。对于交叉开关阵列中某一行／列垂直线上的有效单元，其电流总和

表3。 借鉴脉冲神经网络和神经形态计算的进展，重点介绍可为未来电子纺织品神经网络研究和原型开发提供参考的关键考量因素

| 大脑—神经网络属性／神经形态计算属性 | 受启发的电子纺织品考量因素 |
| --- | --- |
| **突触**/忆阻器：调节电流流动并记住先前电流流动情况的组件——记住先前的电流流动情况。 | 如何在织物环境中表示权重，以模拟突触基于织物的神经元之间的互连。导电线基电阻器，织物环境中的表面贴装器件或纳米器件，以模拟突触权重的工作机制。这些器件的可互换性需要考虑织物环境中的权重，并生成一种围绕如何设计、开发和验证的新方法及基于织物的工艺。如何以可行的方式嵌入可穿戴存储器功能使其在织物环境中无缝运行。基于织物的忆阻器会是什么样子？如何在织物环境中完成并验证这一过程？ |
| **胞体**/神经晶体管：用于捕捉神经元特性的设备，脉冲或达到阈值时产生脉冲。 | 在织物环境中复制一个神经元。借鉴当前的电子人工神经元（漏积分发放、Hodkin-Huxley）。考虑如何创建纺织品和织物基组件，以替代硬质组件元件（导电线基电阻器、基于纺织品的电容器）。电容器）。旨在研究最合适的创建方式。可正常工作的织物神经元的最合适方式，但尽量减少硬质组件，转而使用纺织品版本。 |
| **轴突**/电路互连和信号调理。 | 为了将重点放在基于纺织品的实现上，采用导电线（刺绣导电线神经元互连设计模式），以便轻松复现并创建此类织物神经元互连。 |
| **树突**/三维架构设计实现、模式检测和亚阈值滤波。 | 借鉴神经形态计算中采用的三维架构设计计算方面，这能否激发并启发新的三维织物操控和服装结构中的三维织物分层设计，以嵌入并互连此类由织物驱动的神经网络功能。 |
| **扇入、扇出t**/使用交叉开关阵列实现，但这种方法存在局限无法良好扩展。正在考虑采用更高基数的互连。（Loihi2 提供更快、基数更高的接口）。 | 带有绝缘桥的导电线可消除其中的短路在织物环境中的短路，并可用于在其中嵌入此类交叉开关阵列在纺织环境中的设计。根据所采用的突触类型（导电线电阻器、贴片电阻、忆阻器或其他）一种物理连接到此类突触的方式，需要纳入考量，以评估最佳互连方法，从而连接到基于织物的交叉开关阵列。 |

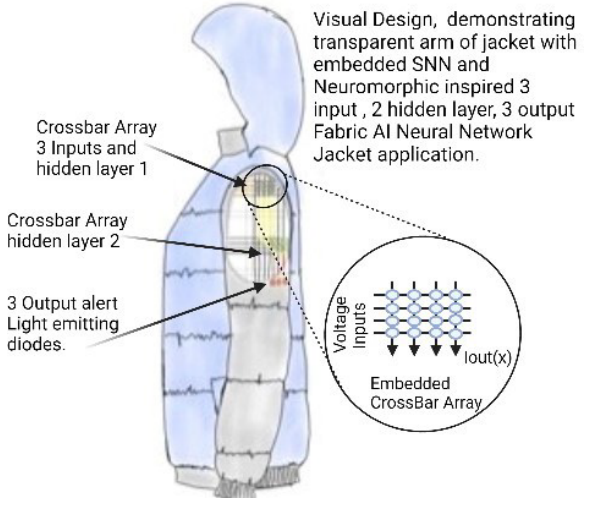


图 8. 采用交叉开关阵列架构设计、嵌入式神经网络的夹克概念设计。

即为输出电流，可根据欧姆定律和基尔霍夫定律计算得出。关于用于脑启发计算神经网络的忆阻器交叉开关阵列的研究已由[35]进行探讨和总结。[54] 报告了一种 *64x64* 无源交叉开关电路，其中约*99* %的器件为非易失性金属氧化物忆阻器，可在神经形态芯片。

从功能和设计的角度来看，如何汲取灵感并将其映射到电子纺织品的织物环境中，以推动嵌入式神经网络的发展？交叉阵列行列结构设计是需要考虑的关键要素；如何在织物材料中实现这一架构设计，以重现此类神经网络 [图 8]。能否尝试采用刺绣技术和图案，使用导电线、织物胶带，或将编织导电元件嵌入织物环境，从而在织物材料中重现此类交叉开关阵列架构？这是值得进一步探索和研究的关键设计要素。

### *B.* 神经形态计算监测/测量

忆阻器也称为阻变随机存取存储器件，能够改变其电阻态，并作为嵌入式存储设备的非易失性存储器。在神经形态领域，忆阻器作为实现高密度存储器的关键组件展现出良好的前景。忆阻器的特性包括器件尺寸小、集成密度高、功耗低、速度快且高度可扩展（Zhang等，2020）。新的研究正着眼于如何在突触应用中控制阻变细丝开关，并进一步探究

用于人工突触的不同忆阻器材料，特别关注有机材料、二维材料、新兴材料（卤化物钙钛矿）和低维材料的突触行为 [33][34]。忆阻器具有高、低电阻态，因此非常适用于基于模拟电路的电路以及硬件多状态神经形态应用。人脑中神经节点之间的互连具有由突触表示的连接强度。忆阻突触是制造人工突触器件的理想候选方案，有助于模拟人工神经元节点之间的互连强度。其核心要求是能够实现并改变电阻态。考虑织物智能材料时，如何将可穿戴存储器融入织物环境，是一个需要深入调查和研究的关键要素。借鉴基于忆阻器的模拟存储电路，在考虑织物材料与应用功能之间的联系时，需要考虑哪些特性和要素？模拟忆阻器的电阻会逐渐变化，因此更适用于模拟电路和神经形态系统应用。双稳态忆阻器可用作二进制存储器/开关以及数字逻辑电路。多状态忆阻器可用于多位存储器、可重构模拟电路和神经形态电路 [32]。加利福尼亚州的艾姆斯研究中心已实现一种将柔性计算机存储器编织进服装的方法。这种柔性存储器通过铜丝和氧化铜导线编织而成。[57] 展示了通过电场组装法开发纺织品忆阻器的先进研究：该方法使用坚韧的纤维，将其编织成可扩展的纺织品忆阻器。这一令人振奋的研究时代将见证纳米技术级忆阻器器件融合所带来的进步。

### *C.* 神经形态计算通信与能效

在交叉阵列设计的基础上，神经形态芯片的进展旨在实现具备能效、更低功耗的架构，以支持所需的精确通信。为实现这一目标，围绕更小型及多个阵列的设计与开发的研究正在进行中。这类多个阵列正逐渐采用横向二维布局或三维垂直堆叠布局。电路设计必须高效，才能在此类三维无源阵列的各层之间实现数据流。三维忆阻神经网络正从三维 NAND 闪存的串堆叠中汲取灵感（Xia 等人）。

从设计角度来看，在考虑如何将多层神经网络嵌入织物环境时，必须考虑织物的关键属性，以及最终用户对设计与可用性功能的关键要求。我们已在 [Fig 5]，中探讨了可能的分层和编织概念设计布局方案；但如果采用三维堆叠分层织物方案，还需要考虑如何互连各层的神经元节点连接。如何以节能、低功耗且占用空间小的方式，将一个织物层与另一个织物层互连以确保织物神经网络达到较高的运行标准。采用基于模块化织物设计的方案，并使用可互换的神经节点和隐藏神经层，或许更为合适；该方案可利用卡扣连接器或 [36] 中所述的其他连接方式，实现神经节点的互连、拆卸和更换。

## VI. 人工智能纺织智能用例示例

在基于织物的环境中嵌入人工智能，具有应用于众多行业应用场景的潜力。这里我们简要列举两个示例，以传达这种先进的织物计算和织物人工智能纺织智能驱动时代的可能性：1）医疗保健/康复领域的应用空间；2）无人飞行器/无人机领域，其中可利用由纺织品驱动的无人机控制智能应用。

### *A.* 医疗保健人工智能智能纺织品应用案例

智能服装应用能够极大地助力远程监测，使个体化和定制化的医疗保健服务实现更完善的实时评估与早期干预。在纺织环境中无缝嵌入人工智能，可进一步提供超越当前技术水平的实时智能可穿戴床旁护理。将人工智能应用于织物可穿戴环境，有望提升最终用户的生活质量。本文提供了两个以最终用户为中心的概念性场景示例。

- Aisling担心感染新冠病毒变异株，希望找到一种新的方式，在不影响日常活动的情况下监测和追踪自己的整体健康状况。Aisling购买了一套人工智能监测套件（纺织传感器和织物人工智能贴片智能模块），可以模块化地安装到她最新的模块化服装中。如今，Aisling的日常服装中已嵌入人工智能，她可以监测自己的呼吸和体温，实时分析数据，并在出现异常时收到提醒，从而及时采取有效措施，及早发现症状，进行新冠检测，并在需要时限制自己的活动。

- Jim 患有癫痫发作。他被诊断为强直阵挛性发作，症状包括肌肉僵硬、呼吸能力减弱、意识丧失（容易跌倒），以及手臂和腿部快速抽搐。由于不知道发作何时会出现，Jim 对独自出门办事感到非常焦虑。这严重影响了 Jim 的生活质量。Jim 的医生向他介绍了一款可穿戴模块化人工智能智能服装，其中嵌入了可更换的织物人工智能，可通过服装内嵌的基于纺织品的传感器，监测 Jim 的体温、呼吸以及特定手臂和腿部肌肉的肌电图（EMG）反应。

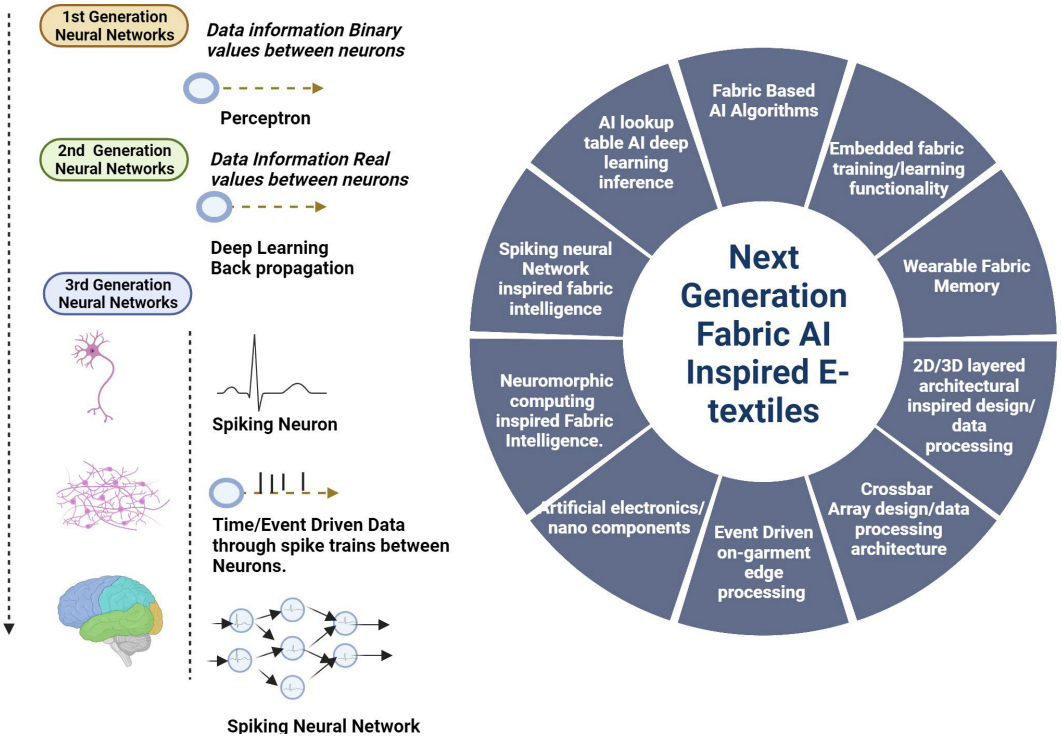


**图9.** 推动新一代智能纺织品发展的核心构建模块与新兴技术，其中融入了受织物人工智能启发的电子纺织品。

这款模块化可穿戴服装与织物人工智能神经网络计算型可更换贴片相连接。如果 Jim 出门办事时穿着这套服装，传感器便会监测他的各项数据。根据织物人工智能神经网络贴片的评估结果，系统可以实时判断 Jim 是否处于癫痫发作前状态。医生向 Jim 解释，这项分析由嵌入服装核心织物和纱线中的智能系统完成，肉眼无法看见。如果检测到癫痫发作前状态，嵌入 Jim 服装袖子中的灯光警报系统会发出简单的视觉警报，提醒他即将发作，并让他有时间寻找安全区域，以尽量减少跌倒和受伤的风险。同时，嵌入式织物人工智能也会向 Jim 的护理人员发出外部警报，告知他们他正处于癫痫发作前状态。这种监测方式让穿戴者感到更有自主感和掌控力。

***B.*** 纺织品驱动的无人机控制用例

电子纺织品在多个领域和行业的应用正日益普及。人们开始考虑并探索超越医疗保健常规范畴的新颖创意。基于织物的人工智能技术不断进步，为融合非传统技术与新兴技术、拓展电子纺织品的应用开辟了新的可能。其中一个例子是将基于织物的智能技术应用于无人驾驶飞行器（UAV）。以下列举了一些可供参考的应用案例。

- 采用模块化设计的动态现场可编程智能服装，或由织物人工智能驱动、具备嵌入式智能控制逻辑功能的智能服装，[55][58], 能够作为无人驾驶飞行器的控制设备，开启更多应用可能。该服装可根据人体控制触发的动作，启动智能纺织传感器作为执行器，从而引导无人驾驶飞行器的运动与控制。此类由织物人工智能驱动的触觉可穿戴设备可用于多种设备，为最终用户提供更无缝的嵌入式控制方案。这在建筑业、国防等领域具有众多创新应用。

## 第七节：结论

显而易见，由人工智能驱动的技术正在飞速发展。大量研究借鉴了脉冲神经网络和神经形态计算在架构设计及规格制定方面的理念，为开发可应用于电子纺织品领域、推动新兴创新的新技术、方法和设计提供了宝贵灵感。本文深入探讨了脉冲神经网络的关键架构属性（人工神经元和突触），以及神经形态计算的关键架构属性（交叉阵列分析、忆阻器、基于堆叠和分层设计的方法），以此开拓相关实验研究方向。表3和[图9] 以概要形式直观呈现了核心要点，旨在启发并推动下一代受织物人工智能启发的电子纺织品领域涌现新颖创新。

这一领域仍需持续开展研究。关键研究问题和挑战仍未得到解答，因此有必要进一步探索这一领域。这些挑战及未来研究方向包括以下内容

- 织物人工智能的规范制定、设计与验证方面的进展。
- 围绕织物人工智能开发语言的识别与开发进行探讨。
- 研究如何将人工智能算法以可操作的方式嵌入织物人工智能环境。
- 在纺织环境中，可采用哪些方法或流程来实现基于机器学习的数据抽象与处理？
- 规范并形式化由纺织品驱动的属性，以支持织物人工智能系统。
- 有必要进一步研究织物人工智能方法的验证，深入探讨可信且可解释的织物人工智能。

过去几年，人工智能技术发展迅猛；现在，电子纺织品领域是时候拥抱这些进步，并以核心定义要素和属性为基础，推动该领域涌现由研究驱动的全新创新成果。

## 参考文献


[1] Hong, Y., Zeng, X., Brunixaux, P., Chen, Y.（2018）。使用人工智能工具评估时装设计。载于《大数据时代的时尚产业人工智能》（第245–256页）。新加坡：Springer。[2] Banumathi, D.P., Sree, T.S., Priya, S.（2015）。纺织品检验中的人工智能技术。[3] Hanbay, K., Talu, M. F., Özgüven, Ö. F.（2016）。织物缺陷检测系统与方法——系统性文献综述。《Optik》，127(24)，11960–11973。[4] Yuldoshev, Nuritdin Tursunov, Bobir Qozoqov, Saidmuhtor。（2018）。人工智能方法在纺织品生产运营规划中的应用。《Journal of Process Management. New Technologies》，6，41–51。10.5937/joupроman6-17221。

[5] Jiang, Siqi Stange, Oliver Bätcke, Fynn Sultanova, Sabina Sabantina, Lilia.（2021）。智能服装的应用——简要概述。纺织产品开发与组装通讯。2。123-140。10.25367/cdatp.2021.2.p123-140。[6] Shi J, Liu S, Zhang L, Yang B, Shu L, Yang Y, Ren M, Wang Y, Chen J, Chen W, Chai Y, Tao X. 用于可穿戴应用的智能纺织品集成微电子系统。《先进材料》。2020年2月；32(5):e1901958。doi: 10.1002/adma.201901958。电子出版日期：2019年7月5日。PMID: 31273850。[7] Loke, G., Yan, W., Khudiyev, T., Noel, G., Fink, Y.（2020）。热拉制多材料纤维电子技术的最新进展与展望。《先进材料》，32(1)，1904911。[8] Park, S., Loke, G., Fink, Y., Anikeeva, P.（2019）。用于神经接口的柔性基于纤维的光电子学。《化学会评论》，48(6)，1826-1852。[9] Rajan, Krishna, Erik Garofalo, and Alessandro Chiolerio. 2018. “用于记忆与计算的可穿戴本征柔软、可拉伸、柔性器件”《传感器》18，第2期：367。https://doi.org/10.3390/s18020367 [10] Zeng, W., Shu, L., Li, Q., Chen, S., Wang, F. and Tao, X.-M.（2014），基于纤维的可穿戴电子设备：材料、制造、器件和应用综述。《先进材料》，26：5310-5336。https://doi.org/ 10 1002 201400633 。/ [11] adma. Loke, Gabriel Khudiyev, Tural Wang, Brian Fu, Stephanie Payra, Syamantak Shaoul, Yorai Fung, Johnny Chatziveroglou, Ioannis Chou, Pin-Wen Chinn, Itamar Yan, Wei Gitelson-Kahn, Anna Joannopou- los, John Fink, Yoel.（2021）。纤维中的数字电子学实现基于织物的机器学习推理。《自然·通讯》。12。10.1038/s41467-021-23628-5。[12] Fernández-Caramés, Tiago M., and Paula Fraga-Lamas. 2018. “迈向智能服装互联网：用于创建智能互联电子纺织品的物联网可穿戴设备与服装综述”《电子学》7，第12期：405。https://doi.org/10.3390/electronics7120405[13] Pelin Yildirim Taser, Vahid Khalilpour Akram，基于物联网的室内跟踪与定位的机器学习技术，《物联网新兴趋势及其与数据科学、云计算和大数据分析的集成》，10.4018/978-1-7998-4186-9.ch007，（123-145），（2022年）。[14] Li, Jun Li, Yafei Li, Lingmin He, Xiaokang Fu, Jingjing Chen, and Xiaokang Zhou. 2021. 纺织制造中的织物缺陷检测：最新技术综述。Sec. and Commun. Netw. 2021（2021）。https://doi.org/ 10 1155 2021 9948808 。/ / Taherkhani A, Belatreche A, [15] Li Y, Cosma G, Maguire LP, McGinnity TM. 生物学上合理的脉冲神经网络中的学习综述。《神经网络》。2020年2月；122:253-272。doi: 10.1016/j.neunet.2019.09.036。电子出版日期：2019年10月11日。PMID: 31726331。[16] Koch, C., Segev, I.（编）。（1998）。神经元建模方法：从离子到网络。MIT出版社。[17] Gerstner, W., Sprekeler, H., Deco, G.（2012）。神经科学中的理论与仿真。《科学》，338(6103)，60–65。[18] Izhikevich, E. M.（2003）。脉冲神经元的简单模型。《IEEE神经网络汇刊》，14(6)，1569-1572。[19] Andreoni, G., Standoli, C. E., Perego, P.（2016）。传感服装设计的需求及相关方法界定。《传感器》（瑞士巴塞尔），16 6 769 10 3390 16060769 ( )，。[20] https://doi.org/。/s Qiang, Siyu and Carey, Tian and Arbab, Adrees and Song, Weihua and Wang, Chaoxia and Torrisi, Felice（2019），基于二维材料全纺织品异质结构的可穿戴固态电容器，《Nanoscale》期刊，第11卷，第20期。[21] Beeman D.（2014）霍奇金–赫胥黎模型。载于：Jaeger D., Jung R.（编）《计算神经科学百科全书》。Springer，纽约州纽约市。[22] A. Bonfiglio 等，“用于纺织品应用的有机场效应晶体管”，载于《IEEE生物医学信息技术汇刊》，第9卷，第3期，第319-324页，2005年9月。[23] Carey, T., Cacovich, S., Divitini, G. 等。用于可穿戴和纺织电子设备的全喷墨打印二维材料场效应异质结。《自然·通讯》8，1202（2017）。[24] Pfeiffer M, Pfeil T. 利用脉冲神经元进行深度学习：机遇与挑战。《Frontiers in Neuroscience》。2018年10月25日；12:774。doi: 10.3389/fnins.2018.00774。PMID: 30410432；PMCID: PMC6209684。[25] M. Hulea, Z. Ghassemlooy and S. Rajbhandari，“具有可见光通信的脉冲神经网络”，2018年第11届通信系统、网络与数字信号处理国际研讨会（CSNDSP），2018年，第1-5页，doi: 10.1109/CSNDSP.2018.8471811。[26] Guo W, Fouda ME, Eltawil AM, Salama KN. 脉冲神经网络中的神经编码：面向鲁棒神经形态系统的比较研究。

《Frontiers in Neuroscience》。2021年3月4日；15:638474。doi: 10.3389/fnins.2021.638474。PMID: 33746705；PMCID: PMC7970006。[27] Zeldenrust, F., Wadman, W. J., Englitz, B.（2018）。突发神经编码——当前状态与未来展望。《计算神经科学前沿》，
12, 48 10 3389 2018 00048 。
[28] ，
https://doi.org/。/fncom.。Coms a, I. M., Versari, L., Fischbacher, T., Alakuijala, J.（2021）。具有时间编码的脉冲自编码器。《神经科学前沿》，15，712667 10 3389 2021。https://doi.org/。/fnins.。
712667 Auge, D., Hille, J.,
[29] 2021
Mueller, E., Knoll, A.（）。脉冲神经网络中用于信号处理的编码技术综述。《神经处理快报》，53(6)，4693-4710。[30] Shi Y, Nguyen L, Oh S, Liu X, Kuzum D. 适用于存内计算应用的脉冲神经网络训练期间软剪枝方法。《Frontiers in Neuroscience》。2019年4月26日；13:405。doi: 10.3389/fnins.2019.00405。PMID: 31080402；PMCID: PMC6497807。[31] Rathi, N., Panda, P., Roy, K.（2019）。用于能效识别的脉冲神经网络中基于脉冲时序依赖可塑性的剪枝与权重量化。《IEEE集成电路与系统计算机辅助设计汇刊》，38，668-677。[32] Xu, W., Wang, J., Yan, X.（2021）。基于忆阻器的神经网络进展。《纳米技术前沿》。[33] Wang, Z. Y., Wang, L. Y., Nagai, M., Xie, L. H., Yi, M. D., Huang, W.，《先进电子材料》2017，3，1600510。[34] Kim, S. G., Han, J. S., Kim, H., Kim, S. Y., Jang, H. W.，《先进材料技术》2018，3，1800457。[35] Xia, Q., Yang, J. J.（2019）。用于类脑计算的忆阻交叉阵列。《自然·材料》，18(4)，309–323。[36] Castano, L. M., Flatau, A. B.（2014）。智能织物传感器和电子纺织品技术：综述。《智能材料与结构》，23(5)，053001。[37] Sethuraman, S. C., Kompally, P., Mohanty, S. P., Choppali, U.（2021）。My-Wear：一种用于自动连续生命体征监测的新型智能服装。《IEEE消费电子汇刊》，67(3)，214-222。[38] Ali, N. A., Abu-Elkheir, M.（2015年10月）。纳米物联网医疗保健应用：需求、机遇与挑战。见2015年第11届IEEE无线与移动计算、网络与通信国际会议（WiMob）（第9-14页）。IEEE。[39] Dong, K., Peng, X., Wang, Z. L.（2020）。用于柔性/可拉伸可穿戴电子设备和人工智能的基于纤维/织物的压电与摩擦电纳米发电机。《先进材料》，32(5)，1902549。[40] Xu, K., Huang, J., Ye, Z., Ying, Y., Li, Y.（2009）。用于DNA生物传感器的纳米材料的最新发展。《传感器》，9(7)，5534-5557。[41] Wood, J.（2018）。服装可穿戴技术的革命。载于《高性能服装》（第325-339页）。[42] She, X.（2022）。面向时空数据处理的异构前馈脉冲神经网络的设计与优化（博士学位论文，佐治亚理工学院）。[43] Shen, J., Liu, J. K., Wang, Y.（2021）。利用循环脉冲神经网络进行动态时空模式识别。《神经计算》，33(11)，2971-2995。[44] Stoliar, P., Schneegans, O., Rozenberg, M. J.（2021）。在固态器件中实现最小循环脉冲神经网络。《物理评论应用》，16(3)，034030。[45] Davies 等，（2018）“Loihi：具有片上学习功能的神经形态多核处理器”，载于《IEEE微》，第38卷，第1期，第82-99页。[46] A. L. 等（2018），Loihi异步神经形态研究芯片。第24届IEEE异步电路与系统国际研讨会（ASYNC）。[47] Cheng, H., Wen, W., Wu, C., Li, S., Li, H.H., & Chen, Y.（2017）。理解IBM神经突触系统的设计及其权衡：用户视角。欧洲设计、自动化与测试会议暨展览会（DATE），2017年，139-144。[48] Chan, J., Gollakota, S.（2017年10月）。使用磁化织物进行数据存储和交互。见第30届ACM用户界面软件与技术研讨会论文集（第655-663页）。[49] Lindrupsen, N.（2021）。探索用于计算机音乐的纺织控制器（硕士学位论文）。[50] Sorbaro M, Liu Q, Bortone M and Sheik S（2020）优化脉冲神经网络在神经形态应用中的能耗。《Frontiers in Neuroscience》14:662。doi: 10.3389/fnins.2020.00662 [51] Blecha, T., Moravcova, D.（2022年5月）。提高纺织电容器容量的方法。见2022年第45届国际电子技术春季研讨会（ISSE）（第1-5页）。IEEE。[52] Park, Y., Park, M.-J., Lee, J.-S.,《先进功能材料》2018，28，1804123。https://doi.org/10.1002/adfm.201804123。
[53] Ham S、Kang M、Jang S、Jang J、Choi S、Kim TW、Wang G。用于可穿戴神经形态应用的单维有机人工多突触，实现电子纺织品神经网络。《科学进展》。2020年7月10日；6(28):eaba1178。doi: 10.1126/sciadv.aba1178。PMID: 32937532。[54] Kim, H.、Mahmoodi, M.R.、Nili, H. 等。4K忆阻器模拟级无源交叉阵列电路。《自然通讯》12，5198（2021）。[55] Rajappan A、Jumet B、Shveda RA、Decker CJ、Liu Z、Yap TF、Sanchez V、Preston DJ。逻辑功能纺织品。《美国国家科学院院刊》。2022年8月30日；119(35):e2202118119。doi: 10.1073/pnas.2202118119。在线发表于2022年8月22日。PMID: 35994641；PMCID: PMC9436326。[56] F. Cleary 等，《可穿戴织物大脑：实现基于服装边缘的传感器数据处理》，载于《IEEE传感器期刊》，第22卷，第21期，第20839–20854页，2022年11月1日，doi: 10.1109/JSEN.2022.3207912。[57] Liu, Y.、Zhou, X.、Yan, H.、Zhu, Z.、Shi, X.、Peng, Y.、Chen, L.、Chen, P.、Peng, H.，用于机织纺织品忆阻器的高性能忆阻纤维。《先进功能材料》。
2022, 32, 2201510 10 1002 202201510 。
[58] 2021
https://doi.org/ . /adfm。Cleary, F.、Henshall, D. C.、Balasubramaniam, S.（）。通过电子纺织品可编程逻辑阵列实现体上边缘计算。《通信与网络前沿》，18。