

# 针织传感器在运动健康服装领域的研究进展

马丕波, 刘青, 牛丽, 李煜天  
(江南大学 教育部针织技术工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 针织传感器具有轻盈、贴体、良好的应变拉伸回复性及成形性等优点, 为实现柔性、无感的运动信号监测及智能可穿戴的运动健康服装制备提供了可能。综述了针织传感器的制备方式, 分析纱线种类、织物组织结构、拉伸传感方向等对其传感性能的影响, 比较针织传感器在生命健康、人体运动等领域应用的优点与不足。指出导电纱线的种类、结构及编织方式是影响针织传感器性能和穿着舒适性的重要因素, 针织传感器在应变拉伸过程中, 二维拉伸与三维形变的电力学特征决定了其有效的应变传感范围。概述了针织传感器在运动健康服装领域所面临的发展机遇与挑战。

**关键词:** 针织传感器; 针织技术; 导电纱线; 灵敏度; 运动健康

**中图分类号:** TS 184; TP 212.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2021)02-0112-07

## Research Progress of Knitting Sensors in the Clothing Field of Sports and Health

MA Pibo, LIU Qing, NIU Li, LI Yutian  
(Engineering Research Center for Knitting Technology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The knitting sensor has the advantages of light weight, close fitting, good stretch strain recovery and great formability, which provides the possibility for realizing flexible and senseless motion signal monitoring and the preparation of intelligent wearable clothes for sports health. The preparation of knitting sensor was reviewed. The influences of yarn types, structure and stretching direction on the performance of knitting sensors were analyzed. The advantages and disadvantages of knitting sensors in the fields of life health and human movement were compared. It was pointed out that conductive yarn was an important factor affecting the preparation, performance and wearing comfort of knitting sensor. During the process of strain stretching, the electric characteristics of two-dimensional and three-dimensional deformations determined the effective strain sensing range. The development opportunities and challenges of knitting sensor in the field of sports health clothes were summarized.

**Key words:** knitting sensor, knitting technology, conductive yarn, sensitivity, sports health

随着科学技术的发展和国民健康意识的增强<sup>[1-2]</sup>, 人们对可实现日常无感、实时监测人体运动数据的可穿戴产品需求愈加迫切, 由此催生了智能手环、运动腕带等智能可穿戴设备<sup>[3]</sup>。目前, 这些智能可穿戴设备<sup>[4]</sup>多利用重力传感器、多轴加速度传感器及图像传感技术进行人体运动信息采集, 在日常感测中虽能较好地反映人体运动状态, 但仍存在硬度高、弹性差等穿着舒适性欠佳及运动细节信号缺失等技术性问题<sup>[5-6]</sup>。因此, 开发集成度高、舒适可穿戴的柔性应变传感器, 实现人体信号传感或运动识别是当前亟待解决的重要问题。

针织应变传感器是将导电纱线通过不同的工艺制得导电针织物或对针织物进行导电性处理, 形成具有传感性能的智能可穿戴器件。针织物基体轻质且柔软, 可有效提高传统智能纺织品的穿着舒适性; 针织结构的大应变及较好的拉伸回复性, 符合智能运动健康传感监测的要求<sup>[7-8]</sup>。文中主要概述了针织传感器的制备方式, 综合比较针织传感器

收稿日期: 2021-01-03; 修订日期: 2021-02-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972172); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(JUSRP22026)。

作者简介: 马丕波(1984—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为纺织结构柔性材料设计与纺织结构复合材料开发。

Email: mapibo@jiangnan.edu.cn

材料种类、组织结构、拉伸方向对其传感性能的影响,分析了针织传感器在运动健康领域的最新应用,在此基础上对其未来的发展进行展望,以期 为 针 织 传 感 器 在 运 动 健 康 服 装 领 域 的 研 究 提 供 参 考。

## 1 针织传感器的制备

针织传感器主要分为电阻式应变传感器、电 容 式 应 变 传 感 器 和 压 电 式 应 变 传 感 器 3 大 类,其中电阻式应变传感器在运动健康服装领域 中 最 为 常 见<sup>[9]</sup>。电阻式应变传感器主要利用电阻 值 的 变 化 表 征 人 体 的 生 理 信 号,实 现 传 感。目前,常用的制备方法有两种:①利用导电纱线在针织 设 备 上 直 接 进 行 编 织;②对 针 织 物 表 面 进 行 处 理<sup>[10-11]</sup>。

### 1.1 采用针织技术制备传感器

部分导电纱线在针织设备上可直接进行针 织 传 感 器 的 编 织,所 用 针 织 技 术 主 要 包 括 经 编 成 型 技 术 和 纬 编 成 型 技 术 2 大 类,不 同 编 织 技 术 制 备 的 针 织 传 感 器 在 传 感 性 能、穿 着 舒 适 性 以 及 产 品 外 观 等 方 面 存 在 一 定 的 差 异。

**1.1.1 经编成型技术** 经编成型技术是指由一 组 或 几 组 平 行 排 列 的 纱 线 沿 着 纵 向 垫 入 一 排 织 针,并 同 步 成 圈 的 一 种 编 织 方 式。经编成型技术不仅可以 制 备 拉 伸 型 传 感 器,还 可 用 于 制 备 压 力 传 感 器。由于利用经编成型技术制备针织传感器的 线 圈 是 沿 着 针 织 物 的 经 向 配 置,因 此,产 品 外 观 平 整、组 织 结 构 紧 密、嵌 花 区 域 背 面 没 有 浮 线,织 物 的 稳 定 性 和 防 脱 散 性 优 于 纬 编 织 物。经编间隔织物因回缩 性 较 好,在 压 力 传 感 器 的 制 备 方 面 存 在 优 势。朱 芳 琴<sup>[12]</sup>研 究 了 织 物 结 构 参 数 对 经 编 间 隔 织 物 压 缩 性 能 的 影 响,结 果 表 明,密 度 大、厚 度 大 且 间 隔 纱 为 单 纤 维 的 间 隔 织 物 有 更 好 的 抗 弯 性 能,可 用 于 制 备 回 复 性 良 好 的 针 织 压 力 应 变 传 感 器。在 局 部 定 位 编 织 方 面,经 编 机 更 适 合 整 片 导 电 织 物 或 条 状 导 电 织 物 的 生 产,但 在 小 面 积 定 位 传 感 器 的 制 备 上 不 具 备 优 势。

**1.1.2 纬编成型技术** 纬编成型技术主要包括 横 机 成 型 编 织 技 术 和 圆 机 成 型 编 织 技 术。

横机成型编织技术是指一根或若干根纱线 从 纱 筒 上 引 出,沿 着 纬 向 顺 序 垫 放 在 横 机 的 相 应 织 针 上 形 成 线 圈 的 一 种 编 织 方 式。横机成型编织技术 包 括 两 针 床 横 机 全 成 型 与 四 针 床 横 机 全 成 型。其中:两针床横机成型技术应用比较广泛,通 用 性 强,但 在 原 料 方 面 要 求 较 高,必 须 选 用 与 针 型 匹 配 的 纱 线 原 料;而 四 针 床 横 机 全 成 型 技 术 可 用 于 一 体 成 型 的 服 装 制 备,更 适 合 复 杂 织 物 的 编 织。利用电脑横

机的嵌花功能可以实现传感器的精确定位<sup>[13]</sup>。横 机 便 于 小 件 针 织 产 品 的 编 织,通 过 配 套 电 脑 软 件 设 计,可 自 动 生 成 袜 子、手 套、护 膝 等 产 品,并 可 根 据 需 要 更 改 尺 寸 与 产 品 形 状。图 1<sup>[14]</sup> 为 双 针 床 岛 精 电 脑 横 机 上 编 织 的 可 监 测 手 指 运 动 的 全 成 型 运 动 手 套。采用电脑横机制备的针织物在纬向成圈、 织 物 稳 定 性 方 面 不 及 经 编,尤 其 是 纬 平 织 物 极 易 产 生 卷 边 现 象;由 于 一 般 横 机 针 号 较 粗,横 机 编 织 的 产 品 结 构 较 为 稀 疏,手 感 较 差。

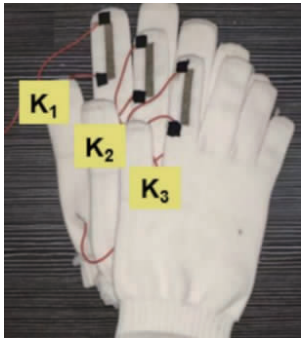


图 1 岛精电脑横机上编织的全成型运动手套

Fig. 1 Fully-formed sports gloves knitted on computerized flat knitting machine using intarsia

圆机成型编织技术是指纱线沿着纬向按照 顺 序 垫 放 在 圆 机 的 相 应 织 针 上 形 成 线 圈 的 一 种 编 织 方 式。圆机成型编织技术不仅可以实现针 织 产 品 的 一 体 成 型,还 能 实 现 多 个 传 感 器 的 定 位 编 织。由于该技术具备转速高、产量高、花形 变 化 快、织 物 品 质 好、工 序 少、产 品 适 应 性 强 等 优 点,因 此 在 制 备 大 面 积 针 织 产 品 及 全 成 型 的 无 缝 运 动 套 装 时 具 有 优 势,全 成 型 技 术 一 次 性 编 织 出 整 件 产 品,可 减 少 生 产 流 程、缩 短 生 产 周 期。圆 机 上 也 可 以 纺 织 比 较 细 的 纱 线<sup>[15-16]</sup>,所 得 织 物 稳 定 性 较 好;但 导 电 区 域 背 面 多 有 浮 线,为 避 免 导 电 纱 线 之 间 的 相 互 干 扰,一 般 需 要 对 浮 线 进 行 清 除 处 理。

### 1.2 针织物表面处理

针织物表面处理是在聚吡咯、石墨烯、纳 米 银 等 导 电 物 质 中 添 加 一 定 比 例 的 还 原 剂、分 散 剂 及 黏 合 剂 等 物 质,通 过 浸 渍、涂 层、丝 网 印 刷 等 方 式,对 织 物 表 面 进 行 处 理,从 而 形 成 稳 定 连 续 的 导 电 网 络 层<sup>[17]</sup>。这种处理方式可以提高传感器的灵敏 度,但 传 感 器 整 体 稳 定 性 较 差。因此,针织物表面处理 的 关 键 在 于 使 织 物 和 导 电 物 质 之 间 形 成 结 合 力 良 好 的 界 面,确 保 导 电 物 质 附 着 性 良 好 且 不 易 脱 落。为 改 善 导 电 物 质 的 附 着 效 果,林 佳 濛 等<sup>[18]</sup>采 用 等 离 子 体 预 处 理 方 法 增 加 聚 吡 咯 在 涤 纶 上 的 附 着 量;为 防 止 导 电 物 质 的 脱 落,保 证 导 电 物 质 拉 伸 时 的 连 续 性 与 均 匀 性,AMJADI M 等<sup>[19]</sup>在 纳 米 银 涂 覆 后 的 织 物

表面覆盖了一层 PDMS,制备了一种可用于手指姿态监测的可拉伸传感器。

2 针织传感器传感性能的影响因素

针织传感器的主要性能包括灵敏度、线性度以及稳定性、重复性、滞后性等,其影响因素有纱线的种类、织物组织结构、拉伸传感方向、线圈之间的相互作用力等。

2.1 纱线的种类

在实际生产中,导电纱线的种类是影响针织传感器性能的关键因素。根据材料的不同,导电纱线实现的方式可以分为两种:①利用具有导电性能的纤维直接纺成纱线;②将普通纱线进行处理使其具备导电性能。根据实际应用情况,具体可以分为金属导电纱线、碳系导电纱线及复合导电纱线<sup>[20-21]</sup>。

1)导电纱线的差异影响针织传感器传感性能。金属、纯碳系等具有导电性能的纱线有着高灵敏度等特点,但由于其存在刚性大等问题,易在织造或使用过程中造成不可逆的机械损伤以及永久性的结构变形,稳定性较差,特别是大应变下急弹回复性较差,严重影响了针织传感器传感性能的稳定性与线性度,难以制作拉伸传感器。在导电纱线中加入氨纶弹性纱、涤纶纱等普通纱线共同编织后,不仅可以增加织物的保形性,而且能够改善传感器的性能。张钰晶等<sup>[22]</sup>利用导电纱线与普通纱线编织了一种嵌花组织针织传感器(见图 2),导电纱线与普通纱线以嵌花的方式进行连接,提高了针织传感器的灵敏度及稳定性。

电物质脱落及纱线表面被氧化等问题,严重影响传感性能,混纺纱及导电包芯纱电阻较大,在灵敏度方面 also 存在问题。许多研究者致力于使用电化学等方式开发新型导电纱线,用于改善现有导电纱线表面导电层易脱落、易氧化及传感性能不佳等问题,但目前相关技术还不成熟,在纺织品领域应用还较少。

2)不同种类导电纱线的电力学特征决定了针织传感器的有效应变范围。金属纳米银线的阻值仅为几到几十欧姆,可用于拉伸型应变传感器。刘婵婵等<sup>[23]</sup>采用 44 dtex 的锦纶镀银纱线,利用圆机成型编织技术制备了一种人体手臂姿势监测的拉伸应变传感器,经过多次重复使用,仍具有较好的传感性能。石墨烯<sup>[24]</sup>、聚吡咯、导电纳米材料等处理的导电纱线阻值在几千甚至上万欧姆,灵敏度较高,可用于压电式应变传感器。刘翠等<sup>[25]</sup>研究了导电纳米纤维膜厚度、材料配比等参数对传感器灵敏度的影响。结果表明,当 Py 单体与纳米纤维质量比为 1:1、导电纳米纤维膜厚度为 48 μm 时,传感器的灵敏度最佳。

2.2 织物组织的结构

织物的组织结构对传感器的线性度与灵敏度影响较大。韩晓雪等<sup>[26]</sup>对 3 种纬编结构传感器的传感性能进行研究,具体结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,在相同的条件下,纬平针组织传感器的灵敏度及导电性能最好,1+1 假罗纹组织传感器的次之,2+1 假罗纹组织传感器的最差,电阻整体呈现先增大后减小的趋势。因此,针织应力传感器的组织结构不应过于复杂,宜用基本组织。韩晓雪等<sup>[26]</sup>还研究了氨纶纬编导电针织物纵向电力学性能,通过与张舒等<sup>[27]</sup>研究结果对比发现,氨纶纬编导电织物纵向的电力学性能与经编织物的相似。由此说明经编织物与纬编织物的传感性能存在一定的相似性,二者都有较好的灵敏度与线性度。RAJI R K 等<sup>[28]</sup>研究发现,矩形传感器的灵敏度高于锯齿形传感器。可以推断针织传感器的形状对其传感性能影响较大,形状简单的针织传感器灵敏度更高。LI L 等<sup>[29]</sup>研究结果表明:随着导电线圈纵行数的增加,传感器的电阻变化呈现增长趋势;而随着导电线圈横列数的增加,传感器的电阻增长趋势减弱,传感器的电阻变化符合针织物线圈纵向为并联、横向为串联的规律。故线圈的横、纵向线圈数与传感器的灵敏度密切相关:横列数一定时,纵行数越少,灵敏度越好;横列数与纵行数相同时,纵横方向上的导电性能类似,但纵向灵敏度一般大于横向。

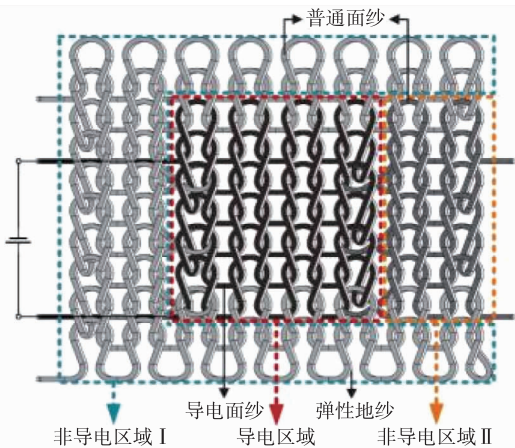


图 2 嵌花组织

Fig. 2 Intarsia stitch

采用金属等导电物质处理普通纱线或与普通纱线混纺制备复合导电纱线,可以改善上机困难的问题,但在编织过程中,导电涂覆类纱线易出现导



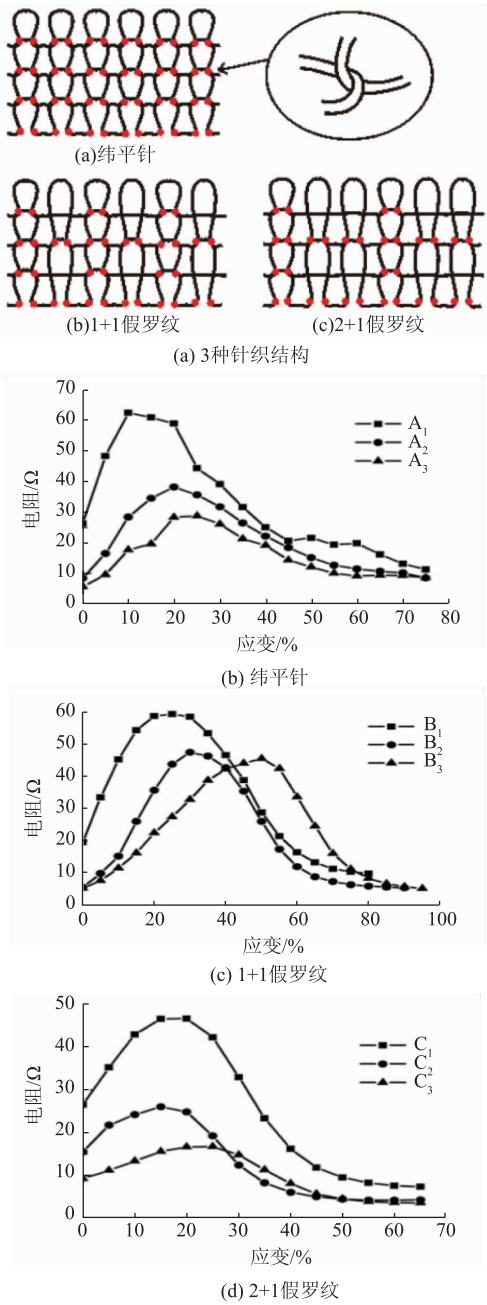


图 3 3 种组织的接触点分布示意

Fig. 3 Distribution schematic diagram of contact points of the three stitches

2.3 传感器的拉伸传感方向

运动服装在实际穿着过程中所受的力多为平面中的两向或多向的拉伸力、剪切力以及三维方向上的曲面拉伸力,因此需要考虑针织传感器不同拉伸方向下的传感性能。目前对传感器拉伸方向的研究多以横、纵向拉伸、双向拉伸及人体实际运动中的三维拉伸为主,以标准实验测试多个方向下电学信号变化的研究实例还比较少。

横、纵向的拉伸存在以下差异:①在拉伸形态方面,横向拉伸下的纱线由圈柱向圈弧转移,且转移程度比较明显;纵向拉伸下的线圈纱线由圈弧向

圈柱转移。②传感器的拉伸方向是影响传感器灵敏度与滞后性的关键因素。横向拉伸时,应变拉伸与回复之间的电阻变化滞后性较小;纵向拉伸时,应变拉伸与回复之间的电阻变化滞后性较明显。多数情况下,纵向拉伸时的电阻变化率大于横向拉伸时的。谢娟<sup>[30]</sup>研究了纬平针传感器在横、纵向拉伸情况下的电阻变化,具体如图 4 所示。由图 4 可以看出,导电织物在横向拉伸中的电阻随着应变的增加呈现近似线性的增长趋势,而在纵向拉伸下电阻变化与应变的关系呈非线性增加。③在拉伸速度方面,随着拉伸速度的增加,传感器的电阻相应增加,但趋势减缓,在较小拉伸速度下,应变拉伸与回复之间存在电阻变化滞后现象<sup>[31]</sup>。

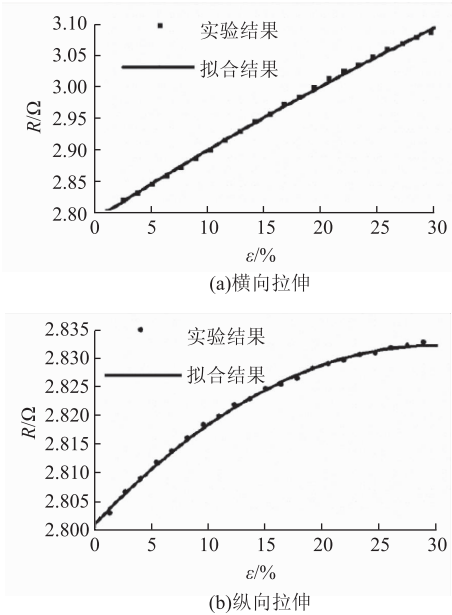


图 4 针织传感器在双向拉伸下的电阻与应变的关系  
Fig. 4 Relationship between resistance and strain of knitted sensor under biaxial stretching

三维拉伸方向更接近佩戴针织传感器时人体的实际感知情况,兼具横、纵向拉伸的共同特点。LI Y T 等<sup>[32]</sup>以小球包裹织物模拟人体膝关节的运动情况,具体如图 5 所示。利用三维曲面评价针织应变传感器的传感性能,与二维测试方法相比,三维曲面的应变传感范围为 120%,是二维拉伸的两倍。

2.4 线圈之间的相互作用力

线圈之间的相互作用力主要影响传感器的接触电阻,等效电阻模型的构建阐明了导电织物的传感机理,用于简化线圈电路,而接触电阻直接影响等效电阻模型预测的准确性。①接触电阻与线圈之间的接触力相关。由于线圈之间存在相互作用力,使线圈转移<sup>[33]</sup>及线圈长度发生变化,从而导致接触电阻变化。王金凤等<sup>[34]</sup>以两根镀银纱线相互

穿套的方式模拟接触力与接触电阻之间的关系,由理论分析和实验研究得知,接触电阻随接触力的增加而呈幂函数减小。②在小应变情况下,线圈之间的接触电阻变化很小,对织物传感性能的影响可以忽略;而在大应变情况下,接触电阻对传感器的伸长-应变线性度产生影响。③线圈之间由于相互紧密接触使得传感器整体阻值较小;采用普通纱线包覆处理的导电纱线制得针织传感器,其线圈之间不存在接触电阻,或裸露的导电纱线产生较小的接触电阻,整体阻值会大幅度增加。

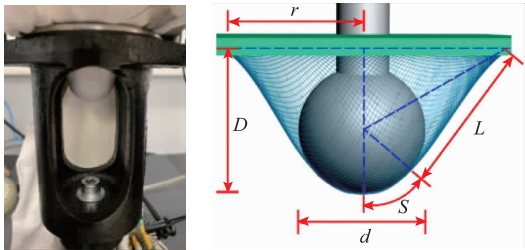


图 5 针织传感器的三维检测实验

Fig. 5 Three dimensional test of knitting sensor

### 3 在运动健康服装领域的应用

针织传感器是采集人体运动信号的重要工具,在智能运动健康服装的发展中,针织传感器发挥举足轻重的作用。其应用范围主要包括日常运动防护、专业运动指导、运动康复指导 3 个方面。

#### 3.1 日常运动防护

随着全民健康意识的不断增强,越来越多的人通过日常运动的监测进行自身防护。当针织传感器在人体运动过程中监测到异常情况时,就会发出警示信号,提醒运动者休息或就医。GARCÍA PATIÑO A 等<sup>[35]</sup>开发了一种无线、舒适的可穿戴式背部运动监测系统,将一根直径为 0.14 mm 的铜线缝到一块呈“T”字形的弹性织物中制备成感应式纺织传感器,并集成到紧身衣的背部,以便监测背部姿势。除人体日常运动的防护外,在日常运动中人体的生理信号监测是目前运动健康领域研究的热点。刘咏梅等<sup>[36]</sup>利用石墨烯织带作为基材覆合于弹性针织面料上,以制备柔性石墨烯传感弹力带,该柔性石墨烯传感弹力带在服装用人体数据采集等方面具有一定的实用性。

#### 3.2 专业运动指导

专业运动指导可以帮助运动者进行运动评估,改善运动不足,规范运动方式,控制运动强度,优化训练效果并降低身体损伤。谢娟<sup>[30]</sup>用纬编针织技术将镀银尼龙导电纱线织成柔性针织物传感器,并集成在智能 T 恤和智能护膝中,分别用于监测肘关

节、肩部、腹部以及膝关节的生理信号,分析不同姿势下的电阻变化情况,但针织传感器采集数据的具体传输方式并不明确。为此,LI Y T 等<sup>[37]</sup>基于镀银导电纱线柔性传感器制备了一种可用于监测人体膝关节运动的紧身裤,对人体平地行走、上下楼梯、跑步状态下的膝关节角度与电阻之间的关系进行分析,并开发了一种可随身携带的数据模块用于传感器电阻信号的采集与输出。单次运动产生的应变电阻信号对于专业运动指导意义不大,但多次运动信号分析对运动指导至关重要。基于此,CHOW J H 等<sup>[38]</sup>制备了一种纺织压力传感监测袜,使用导电纱线连接踝关节处的通信模块,根据应变图像观测穿着者的足部运动情况。

#### 3.3 运动康复指导

运动康复指导可帮助患者更快速地恢复健康,监护范围包括家庭和医院,目前主流的方式是在自我监护的基础上,实现医院等医疗机构的辅助性康复指导。LORUSSI F 等<sup>[39]</sup>设计了一种基于惯性传感器、织物压阻传感器和纺织肌电传感器融合的智能可穿戴系统,该系统以模块化形式设计,由单独的衬衫、裤子、手套和鞋子组成,在日常生活中对中风后康复过程中的人体活动进行监控,可以帮助医生优化和调整患者的培训计划,用于评估中风患者的日常生活与康复情况。HAN X X 等<sup>[41]</sup>利用横机成型编织技术制备了一种在指部嵌入传感器的无缝手套,用于手指姿态判别;HEO J S 等<sup>[40]</sup>设计了一种用 AgNW,PDMS 涂覆的传感手套,并研究不同手指在不同弯曲情况下的电学信号变化情况,为手部的运动健康恢复提供指导。

### 4 结 语

针织传感器在运动健康服装领域的研究已经取得一定的成果,但仍然存在许多不足,故难以得到大范围推广。未来研究重点及发展前景可总结为以下几点:

1)智能运动健康服装应具备趋近于纺织品的服用性能。目前针织传感器的研究成果虽然较多,但大多数注重功能性的实施,在服装压力、透气性、洗涤性等服用性方面的研究还有所欠缺。

2)应构建规范的行业标准。由于针织传感器的种类及制备方法差异较大,使用范围及数据判别标准难以统一。因此,应统一导电材料的参数规格,在实现功能的同时,确保传感器使用的安全性,建立相关的性能、制备、生产标准。另外,在数据传输标准方面,可靠、安全的智能产品才能建立公众

信任,目前在蓝牙的传输模式上有相关标准协议,但是数据的传输需要多个传输网络的相辅相成,因此必须保证个人信息的安全性。

3) 针织传感器与其他智能元件的无痕联接。受限于科学技术的发展,目前针织传感器尚不能单独使用,仍需借助电路、数据处理系统将采集到的信号转化后再输出;利用针织的方式将各智能元件一体成型,可以有效解决线路的问题。

总之,随着时代的发展和科技的进步,针织传感器在运动健康服装领域的研究与应用正朝着健康舒适化、功能多样化、新能源及能量储存方式多元化、信息智能化精准化、价格低廉化等方向发展。

## 参考文献:

- [1] 温雯, 方方. 智能纺织品中的柔性传感器及其应用[J]. 服装学报, 2019, 4(3): 223-229.  
WEN Wen, FANG Fang. Application and research progress of flexible sensor for smart textiles[J]. Journal of Clothing Research, 2019, 4(3): 223-229. (in Chinese)
- [2] 李娜. 基于人体运动状态识别的可穿戴健康监测系统设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [3] 邬楚. 2020 智能穿戴创新 TOP50[J]. 互联网周刊, 2020(16): 12-13.  
PIN Chu. 2020 smart wearable innovation TOP50 [J]. China Internet Week, 2020(16): 12-13. (in Chinese)
- [4] KHOSHMANESH F, THURGOOD P, PIROGOVA E, et al. Wearable sensors: at the frontier of personalised health monitoring, smart prosthetics and assistive technologies[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2021, 176: 1-16.
- [5] CAI S R, LI W, ZOU H S, et al. Design, fabrication, and testing of a monolithically integrated tri-axis high-shock accelerometer in single (111)-silicon wafer[J]. Micromachines, 2019, 10(4): 1-11.
- [6] 杨晨啸, 李鹂. 柔性智能纺织品与功能纤维的融合[J]. 纺织学报, 2018, 39(5): 160-169.  
YANG Chenxiao, LI Li. Integration of soft intelligent textile and functional fiber [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(5): 160-169. (in Chinese)
- [7] 缪旭红, 刘青. 针织应力传感器的研究与应用进展[J]. 纺织导报, 2020(5): 26-30.  
MIAO Xuhong, LIU Qing. Research and application progress of knitting stress sensor [J]. China Textile Leader, 2020(5): 26-30. (in Chinese)
- [8] 丛洪莲, 赵博宇, 董智佳. 智能针织产品开发现状与应用前景[J]. 纺织导报, 2020(5): 20-24.  
CONG Honglian, ZHAO Boyu, DONG Zhijia. Development status and application prospect of intelligent knitting products[J]. China Textile Leader, 2020(5): 20-24. (in Chinese)
- [9] MAITY D, RAJAVEL K, RAJENDRA KUMAR R T. MWCNT enabled smart textiles based flexible and wearable sensor for human motion and humidity monitoring[J]. Cellulose, 2021, 28(4): 2505-2520.
- [10] ZYMELKA D, YAMASHITA T, SUN X R, et al. Large-scale printed strain sensors based on carbon ink incorporated into an intermittent conductive silver pattern[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2021, 60: 1-6.
- [11] JANA P. Assembling technologies for functional garments-an overview [J]. Indian Journal of Fibre and Textile Research, 2011, 36:380-387.
- [12] 朱芳琴. 针织三维间隔织物结构及其性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
- [13] 李思明, 吴官正, 胡雨洁, 等. 压力分布监测袜的制备及其传感性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(7): 138-144.  
LI Siming, WU Guanzheng, HU Yujie, et al. Preparation of pressure distribution monitoring socks and related sensing properties [J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(7): 138-144. (in Chinese)
- [14] HAN X X, MIAO X H, CHEN X, et al. Research on finger movement sensing performance of conductive gloves [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2019, 14(17): 1-7.
- [15] 丁慧, 王新泉, 郭建丽. 横编脱圈技术在产品设计中的应用[J]. 服装学报, 2020, 5(5): 411-414.  
DING Hui, WANG Xinquan, GUO Jianli. Flat knitting remove-loop technology on the application in product design[J]. Journal of Clothing Research, 2020, 5(5): 411-414. (in Chinese)
- [16] 蒋高明, 高哲. 针织新技术发展现状与趋势[J]. 纺织学报, 2017, 38(12): 169-176.  
JIANG Gaoming, GAO Zhe. Development status and tendency of knitting technology innovation[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(12): 169-176. (in Chinese)
- [17] SHI J D, LIU S, ZHANG L S, et al. Smart textile-integrated microelectronic systems for wearable applications[J]. Advanced Materials, 2020, 32(5): 1-37.
- [18] 林佳濛, 缪旭红, 万爱兰. 等离子体预处理对聚吡咯/涤纶经编导电织物结构和性能的影响[J]. 纺织学报, 2019, 40(9): 97-101.  
LIN Jiameng, MIAO Xuhong, WAN Ailan. Influence of plasma pretreatment on structure and properties of polypyrrole/polyester warp knitted conductive fabric [J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(9): 97-101. (in Chinese)
- [19] AMJADI M, PICHITPAJONGKIT A, LEE S, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite[J]. ACS Nano, 2014, 8(5): 5154-5163.
- [20] ZENG W, SHU L, LI Q, et al. Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications [J]. Advanced Materials, 2014, 26

- (31): 5310-5336.
- [21] 王晓雷, 缪旭红, 李煜天, 等. 导电纱线在针织柔性应变传感器上的应用进展[J]. 毛纺科技, 2019, 47(3): 81-84.  
WANG Xiaolei, MIAO Xuhong, LI Yutian, et al. Progress in application of conductive yarns to knitted flexible strain sensors[J]. Wool Textile Journal, 2019, 47(3): 81-84. (in Chinese)
- [22] 张钰晶, 龙海如. 嵌花添纱针织应变传感器的制备与性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 889-895.  
ZHANG Yujing, LONG Hairu. Preparation and performance of intarsia knitting strain sensor[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(6): 889-895. (in Chinese)
- [23] 刘婵婵, 缪旭红, 万爱兰, 等. 手臂监测传感器的设计与验证[J]. 丝绸, 2020, 57(2): 108-113.  
LIU Chanchan, MIAO Xuhong, WAN Ailan, et al. Design and verification of arm monitoring sensor[J]. Journal of Silk, 2020, 57(2): 108-113. (in Chinese)
- [24] SHAO Y Y, WANG J, WU H, et al. Graphene based electrochemical sensors and biosensors; a review[J]. Electroanalysis, 2010, 22(10): 1027-1036.
- [25] 刘翠, 钟卫兵, 王栋. 聚吡咯/聚烯烃弹性体纳米纤维压力传感器的制备及性能应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(6): 94-99.  
LIU Cui, ZHONG Weibing, WANG Dong. Preparation, performance and applications of polypyrrole / polyolefin elastic nanofiber pressure sensors[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(6): 94-99. (in Chinese)
- [26] 韩晓雪, 缪旭红. 氨纶纬编导电针织物纵向电力学性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(4): 60-65.  
HAN Xiaoxue, MIAO Xuhong. Longitudinal electrical physical properties of spandex weft-knitted conductive fabric[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(4): 60-65. (in Chinese)
- [27] 张舒, 缪旭红, RAJI R K, 等. 经编导电针织物的应变-电阻传感性能[J]. 纺织学报, 2018, 39(2): 73-77.  
ZHANG Shu, MIAO Xuhong, RAJI R K, et al. Strain-resistance sensing property of warp knitted conductive fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(2): 73-77. (in Chinese)
- [28] RAJI R K, MIAO X H, ZHANG S, et al. Knitted piezoresistive strain sensor performance, impact of conductive area and profile design[J]. Journal of Industrial Textiles, 2020, 50(5): 616-634.
- [29] LI L, AU W M, WAN K M, et al. A resistive network model for conductive knitting stitches[J]. Textile Research Journal, 2010, 80(10): 935-947.
- [30] 谢娟. 针织物传感器双向延伸电-力学性能及肢体动作监测研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- [31] ATALAY O, TUNCAY A, HUSAIN M D, et al. Comparative study of the weft-knitted strain sensors[J]. Journal of Industrial Textiles, 2017, 46(5): 1212-1240.
- [32] LI Y T, MIAO X H, CHEN J Y, et al. Sensing performance of knitted strain sensor on two-dimensional and three-dimensional surfaces[J]. Materials and Design, 2021, 197: 1-9.
- [33] 王金凤, 龙海如. 线圈转移对导电弹性针织柔性传感器的电-力学性能影响[J]. 纺织学报, 2013, 34(7): 62-68.  
WANG Jinfeng, LONG Hairu. Effect of loop transfer on electro-mechanical properties of conductive elastic wearable knitted sensors[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(7): 62-68. (in Chinese)
- [34] 王金凤, 龙海如, 李家成. 接触电阻对导电纬平针织物柔性传感器的电-力学性能影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(5): 608-613.  
WANG Jinfeng, LONG Hairu, LI Jiacheng. Effect of contact resistance on the electro-mechanical properties of conductive weft plain knitted fabric sensors[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2013, 39(5): 608-613. (in Chinese)
- [35] GARCÍA PATIÑO A, KHOSHNAME M, MENON C. Wearable device to monitor back movements using an inductive textile sensor[J]. Sensors, 2020, 20(3): 1-17.
- [36] 刘咏梅, 熊钰, 杨一凡, 等. 柔性石墨烯传感带拉伸传感性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(1): 35-40.  
LIU Yongmei, XIONG Yu, YANG Yifan, et al. Stretch sensing performance of flexible graphene sensing ribbon[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(1): 35-40. (in Chinese)
- [37] LI Y T, MIAO X H, RAJI R K. Flexible knitted sensing device for identifying knee joint motion patterns[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(11): 1-10.
- [38] CHOW J H, SITARAMAMS K, MAY C, et al. Study of wearables with embedded electronics through experiments and simulations[C]// 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference. San Diego: IEEE, 2018.
- [39] LORUSSI F, CARBONARO N, DE ROSSI D, et al. Wearable textile platform for assessing stroke patient treatment in daily life conditions[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2016, 4: 1-16.
- [40] HEO J S, SHISHAVAN H H, SOLEYMANPOUR R, et al. Textile-based stretchable and flexible glove sensor for monitoring upper extremity prosthesis functions[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(4): 1754-1760.

(责任编辑: 邢宝妹)