

# 基于 CiteSpace 的国内外织物柔性传感器研究的可视化分析

李艳梅, 罗莹

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

**摘要:**针对国内外织物柔性传感器的研究现状,在中国知识资源总库和科技文献数据库检索织物柔性传感器相关文献,导出中文文献1 141篇,英文文献9 573篇。通过 CiteSpace 绘制织物柔性传感器的可视化知识图谱,分析国内外年发文量,国家、机构、作者合作网络分布,高被引文献分布,高频关键词,突现热点词等数据,对比国内外研究现状和趋势,为未来织物柔性传感器的研究提供量化数据支撑。研究表明,近年来国内外织物柔性传感器文献数量整体呈增长趋势,但国内发文量在2023年有所下降,且文章影响力不及美国;国内纺织领域学者正面临着新的挑战,亟须跨学科、跨领域的深度合作。

**关键词:** 织物柔性传感器; CiteSpace 软件; 可视化分析; 知识图谱

**中图分类号:** TP 212; TS 106 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2024)05-0448-08

## Visual Analysis of Domestic and International Research on Textile Flexible Sensors Based on CiteSpace

LI Yanmei, LUO Ying

(Textile and Clothing College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In response to the current research status of textile flexible sensors at home and abroad, this paper conducted a literature search on relevant texts in the China National Knowledge Infrastructure and the Web of Science Database. A total of 1 141 Chinese articles and 9 573 English articles were extracted. A visual knowledge map of textile flexible sensors was drawn using CiteSpace to analyze the annual publication volume, distribution of countries, institutions, authors, highly cited articles, high-frequency keywords, and emerging hot words. The study compared the current research status and trends at home and abroad, providing quantitative data support for future research on textile flexible sensors. The results show that the number of textile flexible sensor-related articles at home and abroad as a whole has increased in recent years, but the domestic publication volume will decline in 2023, and the influence of articles is less than that of the United States. Chinese textile scholars are facing new challenges and urgently need cross-disciplinary and cross-sectoral in-depth cooperation.

**Key words:** fabric flexible sensor, CiteSpace software, visual analysis, knowledge graph

2024年,国家发展改革委颁布的《产业结构调整指导目录(2024年本)》鼓励智能制造、新材料等

高新技术产业的发展<sup>[1]</sup>。深圳作为国内科技发展前沿城市,2022年颁布的《深圳市关于推动智能传

收稿日期:2024-03-27; 修订日期:2024-08-15。

基金项目:教育部人文社会科学一般项目(23YJCZH022)。

作者简介:李艳梅(1974—),女,教授,博士生导师。主要研究方向为高性能服装材料及产品研发、数字化纺织服装技术。

Email:lym0350@126.com

传感器产业加快发展的若干措施》已提出一系列智能传感器产业的扶持和推动措施<sup>[2]</sup>。这些文件的颁布为服装柔性传感器指明了发展方向,指导服装行业加强智能技术创新,为服装柔性传感器的研发及应用提供了有力支持。

智能可穿戴服装融合了传感器、智能芯片等多方面技术,预示着纺织行业朝着科技创新、功能多样化和用户体验提升的方向发展。织物柔性传感器通过导电传感技术成为服装实现智能化的桥梁,其作为检测信号、传递信息、实现智能化的核心部件<sup>[3]</sup>受到专家学者广泛关注。近年来,有关纺织柔性传感器的综述<sup>[4]</sup>研究较多,但大多是针对服装技术,从数据角度梳理分析其文献的较少<sup>[5]</sup>,具有量化数据的结论支撑不足,且仅着眼国内,未综合对比国内外研究现状。因此,文中放眼全球,使用计量学知识搜集整理国内外文献,选用中国知识资源总库(China National Knowledge Infrastructure,CNKI)和科技文献数据库(Web of Science,WOS),分析文献万余篇,厘清织物柔性传感器的发展历史、行业现状,科学预测其研究热点和未来发展趋势。

### 1 数据来源与分析方法

CNKI 数据库拥有海量的中文文献资源,能够全面覆盖国内的织物柔性传感器研究现状。以 CNKI 为数据来源,采用关键词检索“柔性传感器”和“服装”,“柔性传感器”和“可穿戴”,“柔性传感器”和“织物”;勾选同义词拓展,检索时间范围为 2008 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日,检索到学术期刊论文 385 篇、学位论文 756 篇,共计 1 141 篇;将文献导入 CiteSpace 软件,设置时间切片为 1 年;词汇来源包括主题、摘要、作者主观提炼的关键词(descriptors,DE)和数据库自动生成的关键词 Plus(identifiers,ID);节点筛选方式选择 g-index(系数  $k=25$ )。

WOS 数据库收录了全球顶尖的学术期刊,有助于了解国际上织物柔性传感器研究的前沿动态。以 WOS 为数据来源,采用关键词检索“flexible sensors”“clothing”“flexible sensors”“fabric”“flexible sensors”“wearable”;不限学科领域,检索时间为 2008 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日,锁定文献类型为论文与综述,共搜索到 9 573 篇文献;将其导入 CiteSpace 软件,时间切片、词汇来源、节点筛选方式与中文文献的设置保持一致。

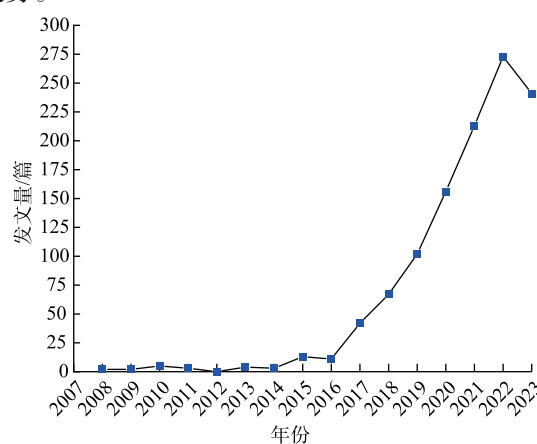
近年,计量学工具 CiteSpace 已成为研究人员在文献分析和数据可视化的重要工具之一。文中采

用 CiteSpace 软件分析文献数据,解读文献知识结构,挖掘作者、地区、关键词等数据信息,构建合作网络,探索国内外织物柔性传感器的前沿研究并预测未来发展趋势。

### 2 数据统计与分析

#### 2.1 发文频次计数

对中文文献年发文量进行检索,相关领域涉及自动化技术、有机化工、计算机软件等学科,具体如图 1 所示。由图 1 可知,2008—2014 年在纺织柔性传感器领域的发文量每年不超过 10 篇,尚未引起广泛关注和研究兴趣。2015 年开始,随着智能电子和信息化科技迅速崛起,可穿戴产品崭露头角<sup>[6]</sup>,越来越多的专家学者开始关注智能元素在服装上的应用<sup>[5]</sup>。2017 年服装柔性传感器技术不断发展、应用领域也逐渐拓宽,知网年发文量快速攀升,表明该领域研究进入高峰期。之后几年的年发文量先呈上升趋势随后稍有下降,2022 年达到顶峰,发文 273 篇。2023 年年发文 241 篇,相较 2022 年有所下降。2008—2023 年,服装柔性传感器领域研究在知网上的发文量从 2 篇增长到 241 篇,增长约 120 倍,表明该领域研究活动显著增多,呈快速增长趋势。



年份	发文量/篇
2007	0
2008	2
2009	2
2010	2
2011	2
2012	2
2013	2
2014	2
2015	10
2016	10
2017	40
2018	70
2019	100
2020	150
2021	210
2022	273
2023	241

图 1 中文文献年发文量

Fig. 1 Annual publication volume chart of Chinese literature

英文文献年发文量如图 2 所示。由图 2 可知,2008—2012 年,英文文献对织物柔性传感器的讨论较少,2013 年稍有增长,属于起步阶段,年发文量 30 篇以下。2014 年德国 future TEX 计划的提出使一些专家学者聚焦到智能纤维与智能纺织品上<sup>[4]</sup>,年发文量 82 篇,相比 2013 年成倍增长,织物柔性传感器进入快速发展阶段。2015 年苹果发布了 Apple Watch<sup>[7]</sup>,智能可穿戴设备走进大众视野,带动了可穿戴传感器的发展,年发文量达到 125 篇。2016—

2023 年发文量呈爆发式增长,大量研究人员与机构投入相关研究中,年发文量从 2016 年的 233 篇攀升到 2023 年的 1 966 篇。纵观 2008—2023 年,织物柔性传感器领域的英文发文量增长约 217 倍,发展迅猛。2023 年发文 1 966 篇,基本保持原增幅。

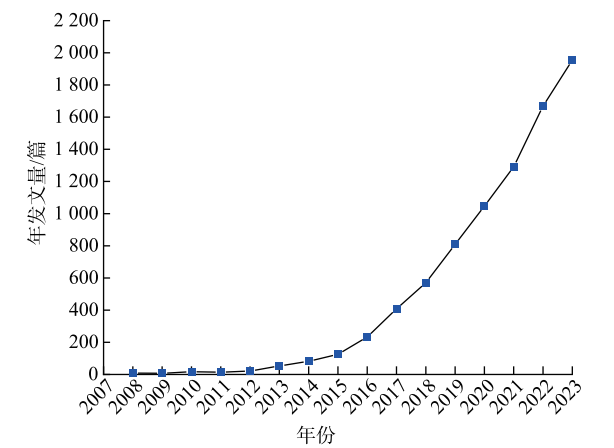


图 2 英文文献年发文量

Fig. 2 Annual publication volume chart of English literature

2023 年,中文文献中有关织物柔性传感器的研究论文增长趋势放缓。究其原因,随着研究的深入,纺织柔性传感器的技术难题逐渐显现,如高昂的制造成本限制了柔性可穿戴产品的市场推广;各领域间的合作不足也制约了柔性传感技术的快速发展。为应对这些挑战,研究人员需要加强柔性传感技术研发,降低成本,探索新的应用领域,并加强跨学科合作,共同推动织物柔性传感器技术的进步。

2.2 合作网络分析

2.2.1 国家合作网络分析 CiteSpace 节点中心性指以经过节点最短路径的数目多少来刻画节点重要性,节点周围连线多少表示中心性大小。节点中心性显示了各个国家在纺织柔性传感器方向的研究影响力,节点大小显示出版文章数量多少,节点颜色表明了各个国家纺织柔性传感器领域的发文活跃时期及起始时间,连线多少代表国家之间合作的密切程度。

英文文献发文量排名前 10 名的国家见表 1。国家合作网络如图 3 所示。由表 1 及图 3 可以看出,从中国开始顺时针方向按发文数量从大到小排列,合作网络密度为 0.15,各国家之间的联系较为紧密。中心性最强的 5 个国家依次为美国(0.30, 1 767 篇)、印度(0.20, 597 篇)、中国(0.18, 8 148 篇)、澳大利亚(0.14, 373 篇)、法国(0.13, 149 篇)。其中美国相关研究起步较早,中心性为 0.30,国际

影响力较高,创新性强。虽然中国文献发表数量远高于其他国家居世界第一,但中心性仅为 0.18,表明中国在纺织柔性传感器领域,所发表的论文国际影响力较弱。

表 1 英文文献发文量排名前 10 的国家

Tab.1 Top 10 countries ranked by the number of English literature publications

序号	发文量/篇	节点中心性	英文文献发文量排名前 10 的国家
1	8 148	0.18	中国
2	1 767	0.30	美国
3	1245	0.05	韩国
4	597	0.20	印度
5	400	0.10	英国
6	400	0.02	日本
7	373	0.14	澳大利亚
8	359	0.01	新加坡
9	328	0.09	意大利
10	305	0.07	加拿大

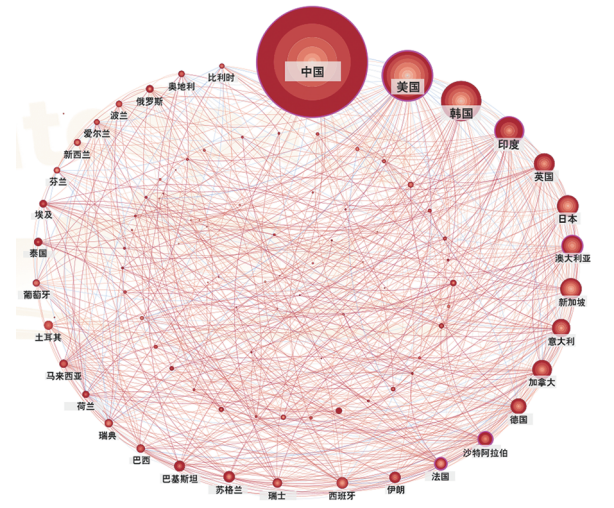


图 3 国家合作网络

Fig.3 National cooperation network diagram

2.2.2 作者合作网络分析 CNKI 数据库中的中文文献合作作者集群如图 4 所示。节点大小代表发文量多少,节点越大代表发文量越多;节点颜色代表发文时间,颜色越暖代表发文时间越近。由图 4 可知,主要有 4 个明显的作者集群,总体作者合作网络密度为 0.007 5,表明作者合作程度低。2016 年曲丽君、田明伟开始合作,早期主要致力于石墨烯及其他新型导电材料的制备<sup>[8]</sup>,后来逐渐过渡到其他纤维基底的柔性应变传感器的研究<sup>[9]</sup>。2018 年刘皓等<sup>[10]</sup>主要针对各种基底柔性应变传感器的研究进展和发展前景进行分析与阐述。王晓雷等<sup>[11]</sup>、王金凤等<sup>[12]</sup>主要研究基于针织物的柔性应



变传感,探究不同针织织造工艺对应变传感的影响。

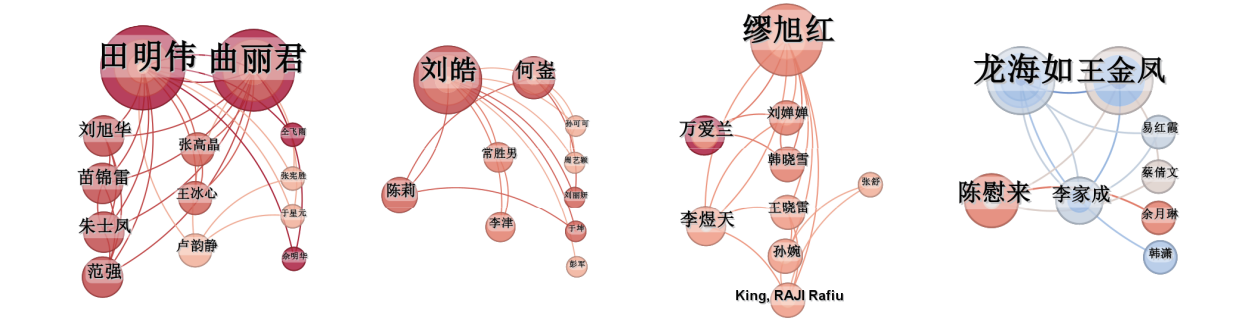


图 4 中文文献合作作者集群网络

Fig. 4 Network diagram of collaborative author clusters in Chinese literature

2.3 高被引文献分析

被引次数是评价学术文献影响力的重要指标之一,被引分析为构成一个领域内的知识基础提供了重要参考<sup>[13]</sup>。文中选取 WOS 数据库文献中引用次数最多的文章作者,颜色冷暖代表了被引文献的发文时间,具体如图 5 所示。

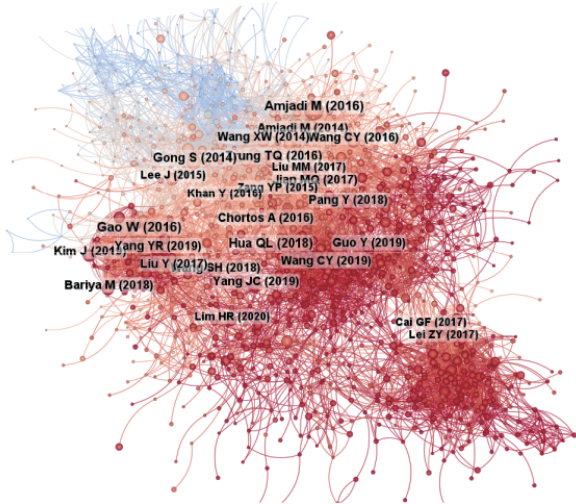


图 5 高被引英文文献

Fig. 5 Highly cited English literature

由图 5 可知,被引次数最多的是 GAO W 等<sup>[14]</sup>发表的关于可穿戴汗液检测柔性传感器,该研究弥补了可穿戴生物传感器中信号转换、调节、处理和无线传输技术的不足,为其他研究人员提供了重要的参考和借鉴,被引 478 次。AMJADI M 等<sup>[15]</sup>通过整合最新研究成果、揭示新的传感机制、提供模拟和实验结果、描述潜在应用场景以及揭示挑战与机遇,促进了柔性传感器领域的发展,被引 442 次,被引量位居第 2。TQ T 等<sup>[16]</sup>回顾了柔性可拉伸传感器在温度、压力和应变检测方面的研究,分析其在结构、技术创新方面面临的挑战,及在人体活动监测和健康管理方面的应用,具有一定的市场潜力和实际应用价值,因此吸引了大量研究者的关注,被

引 338 次。这 3 篇文献均发表于 2016 年,这些成果使服装柔性传感器领域的研究取得了重大突破,且至今仍为后续的研究和应用提供重要的参考依据。

2.4 关键词分析

2.4.1 高频关键词分析 关键词凝练概括了文章的重点词,其频次和中心性可以反映本领域内的研究热点<sup>[17]</sup>。利用 CiteSpace 中的关键词分析,导出图谱中高频关键词及其频次、中心性、首次出现年份等信息,并剔除传感器、性能、制造、可穿戴、柔性等表示主题的共性关键词,具体结果见表 2 和表 3。

Tab. 2 High-frequency keywords in Chinese literature				
序号	频次	中心性	首次出现年份	关键词
1	59	0.15	2019	水凝胶
2	59	0.15	2018	石墨烯
3	46	0.05	2017	碳纳米管
4	35	0.09	2009	灵敏度
5	32	0.05	2019	静电纺丝
6	29	0.05	2018	健康监测
7	28	0.03	2018	柔性电子
8	27	0.08	2019	人机交互
9	27	0.08	2011	传感性能
10	23	0.03	2015	微结构

Tab. 3 High-frequency keywords in English literature				
序号	频次	中心性	首次出现年份	关键词
1	1 465	0.01	2013	strain sensor, strain sensors
2	1 225	0.01	2014	skin, electronic skin
3	1 042	0.01	2010	flexible, wearable electronics
4	823	0.02	2013	transparent
5	791	0.01	2015	pressure sensor
6	643	0.03	2009	films
7	490	0.01	2014	pressure
8	482	\	2014	graphene
9	470	0.01	2011	carbon nanotubes
10	466	\	2012	composite

注:“\”表示关键词中心性<0.01。

分析国内外高频关键词,可知国内外有关织物柔性传感器的研究可以大致分为以下 3 种。

1)对微电子、微结构、柔性电子器械等传感器物理元件及信号采集方面的研究。主流织物柔性传感器按信号转换机制可分为电阻式、电容式和压电式 3 种。电阻式传感器方便快捷,成本较低;电容式传感器灵敏度高,可检测微小外力变化;压电式传感器对动态外力刺激高敏感、有自供电的潜力<sup>[18]</sup>。李伊梦等<sup>[19]</sup>以石墨烯油墨为功能层、聚二甲基硅氧烷为柔性材料,制备了具有仿生银杏叶微结构的柔性压阻式压力传感器,其响应时间缩短至约 80 ms,可以在 10 000 次的循环压力测试下保持稳定良好的性能。付如民<sup>[20]</sup>将聚偏二氟乙烯与柔性基底水凝胶复合,制备了一种力电响应性优异的压电式传感器,能准确测定外力大小。为保持电容式传感器优良特性的同时提高其灵敏度,杜青等<sup>[21]</sup>设计了一种“三明治”结构的电容式传感器,以柔性材料(聚二甲基硅氧烷)与导电颗粒(乙炔黑)的混合物为介质层,以溅射在聚对苯二甲酸乙二醇酯上金属氧化铟锡的导电膜作上下层电极,耐久性好,稳定性高,经过 100 次弯折后灵敏度几乎没有下降。J A S 等<sup>[22]</sup>也设计了一款中间层为压电复合膜甘氨酸-壳聚糖,夹在两个氧化锌导电纺织电极之间的“三明治”结构压电式传感器在较宽范围的传感压力下都表现出良好的压电响应。在信号采集、织物柔性传感器领域,研究最为广泛的是 ECG 信号的采集<sup>[23]</sup>,可用于记录生物电位。

2)各种柔性导电材料的研发及制备。纺织服装界内专家学者通过浸渍涂覆、包缠法、混纺、静电纺丝等方式赋予织物导电传感性能,制造了各种应用于纤维基<sup>[24]</sup>、纱线基<sup>[25]</sup>的可穿戴柔性传感器材料,包括纳米纤维材料<sup>[26]</sup>、半导体材料<sup>[27]</sup>、碳材料<sup>[28]</sup>等。其中,碳纳米管<sup>[29]</sup>的卫生性能、抗静电性能、防紫外线性能优良,用途广泛,在中文文献中作为高频关键词出现;而石墨烯材料<sup>[30]</sup>、MXene 等水凝胶<sup>[31-33]</sup>、MoS<sub>2</sub><sup>[34]</sup>等材料种类丰富、结构独特,光、电、磁等物化性质优异,在制备柔性传感器中展现出了巨大潜力。另外,碳纳米管、石墨烯材料作为中英文文献同时出现的高频关键词受关注最多。因此,无论是在过去还是将来,在使用新型材料的同时优化其灵敏度、提升柔性都是国内外专家学者的研究重点。

3)柔性传感器在可穿戴领域的应用。通过高频关键词的分析可知,在纺织柔性传感器应用方

面,健康监测最受关注。健康监测通过非侵入方式对心率、血压、体温、呼吸频率等人体各项生理指标进行实时监测,并提供精准数据。传统血压测量仪便携性差,且不可实时监测。为弥补此缺陷,刘皓等<sup>[35]</sup>设计开发了一款超声阵列柔性传感器,能够持续监测人体动脉血压波形,监测结果准确。纺织柔性传感器也能监测关节角度、肌肉张力、肌电信号、运动速度等数据,助力运动监测和动作识别。智能手套就是纺织柔性传感器在手势识别方面的具体应用。针对可穿戴智能手套自供电的瓶颈问题,董泽宇等<sup>[36]</sup>设计了一种无电池自供电的无线手势识别智能手套的系统方案,可以在无电池自供电的条件下完成对简单手势信息的采集和传输工作。

2.4.2 热点迁移分析 突现词是指某一时段内突现的关键热词,显示了在短期内变化较大、中心强度最大的关键词,能从一定程度上预测行业内的前沿研究。热点迁移分析展现了样本文献各时间段的突现词、爆发年份、结束年份等信息。中英文文献突现词见表 6。



(a) 中文文献突现词



图 6 中英文文献突现词示意

Fig. 6 English and Chinese literature emergence word list

依据突现时间和突现强度,图 6 选取关键词突现的最短年限为“2”的前 25 个突现词。蓝色线代表了关键词的活跃时间,红色线代表关键词的爆发时间。时间长短一定程度上代表了研究是否具有可持续性,暗示了研究的深入情况。将中英文文献突现词的发展分为基础期和发展期两个阶段。

1)基础期。中文文献基础期主要关键词为导电纤维、导电性能、导线纱线等基础研究,突现时间从 2010—2017 年,热度较高,热点时间长,说明在此期间国内学者扎根于纤维、纱线等基础性研究<sup>[37]</sup>。2008—2012 年为英文文献的基础期,文献内容多聚焦于设计、传感系统、高性能传感等,研究持续至 2018 年左右,比中文研究更为深入。

2)发展期。随着材料科学、微电子学、无线通信等领域的发展,人们对织物柔性传感器的研究也更加细致和深入。中文文献在 2014—2023 年涉及一些新材料、新技术等新的关键词,如智能服装、印刷电子、压电性能、超疏水材料、石墨烯等,说明柔性传感器的发展为人们提供了更多可选择材料和制造方法。2013—2018 年为英文文献织物柔性传感器研究领域发展期,人造皮肤、晶体管、超薄、可拉伸电子器件是该阶段出现的热点新词。2019 年及之后英文文献在相关领域的研究热点为纳米

线、水凝胶、发光二极管、柔性锂电池等材料的研发改进,同时也关注运动监测、健康监测等实际应用方面。

未来织物柔性传感器将呈现出与机械、材料、计算机和医学等学科的多元化与深入化合作的发展趋势。如织物柔性传感器通过与机械工程和电子工程等学科的融合,在提升传感器与其他电子元件及纺织品的兼容性和集成度的基础上,有望实现织物的自供电和无线传输,使织物柔性传感器更加轻量化。在材料研究方面,专家学者将继续探索和开发具备更高柔韧性、灵敏度、稳定性及生物相容性的新材料,包括新型纳米材料、生物基材料、有机高分子材料及其复合物等。随着传感器获取的数据量不断增加,人工智能技术将为柔性传感器领域带来新的机遇。借助更先进的算法和模型,海量数据将得到更深入、更准确地解析,从而为用户提供更精准、更个性化的监测和反馈,推动智能化和自适应性的发展。此外,织物柔性传感器与人造皮肤技术的结合正成为柔性传感器在医学领域应用的热点与趋势。这一进展将推动其在触觉感知、伤口愈合监测等医疗方面的应用,解决传感器易位移的问题,实现更加精准的数据监测。

3 结 语

利用 CiteSpace 软件对 2008—2023 年 CNKI 和 WOS 数据库中织物柔性传感器领域文献进行解析,通过计量学方法厘清了研究现状与动态前沿信息。

从文献发表数量看,近年纺织柔性传感器领域文献数量整体呈增长趋势,具体表现为前期数量少,后期大幅度增长,2008—2023 年,中文文献发文增长约 120 倍,英文文献发文增长约 217 倍。2023 年,英文文献发文量未见明显下降,但中文发文数量有所下降,国内相关研究遇到瓶颈。

从研究合作网络和引用情况看,中国在 WOS 数据库中发文 8 148 篇,稳居于世界第一,但中心性仅为 0.18,国际影响力不及中心性 0.30 的美国。中国有以田明伟、刘皓、龙海如等为代表的作者集群,为纺织柔性传感器的研究奠定了坚实基础。GAO W、AMJADI M、TRUNG T Q 等是高被引文献的作者,其所研究的织物柔性传感器技术在 2016 年取得了重大突破,对推动学科发展和解决实际问题具有重要价值。

从研究内容看,国内外有关织物柔性传感器的研究可以大致分为 3 种:①对柔性传感器物理元件及信号采集方面的研究;②各种柔性导电材料的研



制;③柔性传感器在可穿戴领域的应用。

从研究热点看,同一时段内中文文献与英文文献没有明显差别,但在深度与国际影响力上中文文献不如英文文献。在研究趋势上,中英文文献都聚焦于柔性材料的技术创新及功能应用的研究,石墨烯、水凝胶、碳纳米管、健康监测是近年来的研究热点。

国内纺织领域学者正面临着开发高灵敏度、高舒适性、多功能智能设备的挑战。传感器与织物的结合方式、传感器对织物性能的影响限制了研究的深度与广度;制造成本高,带有柔性传感器的织物、可穿戴设备投入市场少,市场反馈少;各作者、机构、国家之间合作少。针对这些问题,应加强技术研发和创新,提高传感器的灵敏度、稳定性、生物相容性等性能;降低成本,寻求可行的批量生产方案;加强与医学、材料科学、电子工程、计算机科学等学科的交流,共享资源、优势互补;拓宽新的应用场景,提高市场需求;加强国家、机构、作者、企业间的合作,共同推动织物柔性传感器技术的研发和应用,让科技更好地造福全人类。

参考文献:

[ 1 ] 国家发展和改革委员会. 产业结构调整指导目录(2024 年本)[EB/OL]. (2023-12-27)[2024-03-07]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20305>.

[ 2 ] 深圳市人民政府发展研究中心. 深圳市关于推动智能传感器产业加快发展的若干措施[EB/OL]. (2022-12-26)[2024-03-07]. [http://drc.sz.gov.cn/ydd/xxgk/zcwj/zcfg/content/post\\_10562853.html](http://drc.sz.gov.cn/ydd/xxgk/zcwj/zcfg/content/post_10562853.html).

[ 3 ] 李万军,王紫怡,周梦烨,等. 基于文献计量图谱的国内外智能纤维研究现状及趋势[J]. 丝绸, 2023, 60(11): 39-49.

LI Wanjun, WANG Ziyi, ZHOU Mengye, et al. Research status and trend of intelligent fibers at home and abroad based on bibliometric atlas[J]. Journal of Silk, 2023, 60(11): 39-49. (in Chinese)

[ 4 ] 张朋莉,刘皓,王探宇. 织物基柔性传感器研究进展[J]. 针织工业, 2022(12): 81-85.

ZHANG Pengli, LIU Hao, WANG Tanyu. Research progress of fabric-based flexible sensors[J]. Knitting Industries, 2022(12): 81-85. (in Chinese)

[ 5 ] 林坪坪,刘秀玲. 中国纺织技术研发重点与热点[J]. 针织工业, 2017(10): 69-74.

LIN Pingping, LIU Xiuling. Key points and hotspots of China's textile technology research and development[J]. Knitting Industries, 2017(10): 69-74. (in Chinese)

[ 6 ] 赵元轩. 可穿戴智能产品设计发展趋势探究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

[ 7 ] 沈雷,李仪,薛哲彬. 智能服装现状研究及发展趋势[J]. 丝绸, 2017, 54(7): 38-45.

SHEN Lei, LI Yi, XUE Zhebin. Current situation and development trend of intelligent garment[J]. Journal of Silk, 2017, 54(7): 38-45. (in Chinese)

[ 8 ] 杜敏芝,田明伟,曲丽君. 二氧化锰石墨烯整理棉织物的电热及传感性能研究[J]. 棉纺织技术, 2016, 44(12): 25-29.

DU Minzhi, TIAN Mingwei, QU Lijun. Electroheat and sensing property study on MnO<sub>2</sub> graphene finished cotton fabric[J]. Cotton Textile Technology, 2016, 44(12): 25-29. (in Chinese)

[ 9 ] 房翔敏,曲丽君,田明伟. 自供电纺织基柔性应变传感器研究进展[J]. 丝绸, 2022, 59(8): 36-47.

FANG Xiangmin, QU Lijun, TIAN Mingwei. Research progress of self-powered textile-based flexible stress sensors[J]. Journal of Silk, 2022, 59(8): 36-47. (in Chinese)

[ 10 ] 刘皓,陈婷婷,赵利端,等. 聚吡咯涂层织物的研究进展[J]. 纺织导报, 2018(3): 64-67.

LIU Hao, CHEN Tingting, ZHAO Liduan, et al. Research progress on the fabric with PPy-coating[J]. China Textile Leader, 2018(3): 64-67. (in Chinese)

[ 11 ] 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)

[ 12 ] 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)

[ 13 ] LIU Z G, YIN Y M, LIU W D, et al. Visualizing the intellectual structure and evolution of innovation systems research: a bibliometric analysis[J]. Scientometrics, 2015, 103(1): 135-158.

[ 14 ] GAO W, EMAMINEJAD S, NYEIN H Y Y, et al. Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis[J]. Nature, 2016, 529(7587): 509-514.

[ 15 ] AMJADI M, KYUNG K U, PARK I, et al. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: a review[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(11): 1678-1698.

[ 16 ] TRUNG T Q, LEE N E. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare[J]. Advanced Materials, 2016, 28(22): 4338-4372.

[ 17 ] 丁士宁,张克旺. 基于 CNKI 的 CiteSpace 应用可视化分析[J]. 现代信息科技, 2023, 7(6): 124-127, 131.

- DING Shining, ZHANG Kewang. Visualization analysis of CiteSpace application based on CNKI[J]. Modern Information Technology, 2023, 7(6): 124-127, 131. (in Chinese)
- [18] 王晓雷, 缪旭红, 孙婉. 针织间隔导电织物的压力电阻传感性能[J]. 丝绸, 2020, 57(4): 17-21.  
WANG Xiaolei, MIAO Xuhong, SUN Wan. Pressure resistance sensing properties of knitted spacer conductive fabrics[J]. Journal of Silk, 2020, 57(4): 17-21. (in Chinese)
- [19] 李伊梦, 侯晓娟, 张辽原, 等. 石墨烯/PDMS 仿生银杏叶微结构柔性压阻式压力传感器[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(3): 198-203.  
LI Yimeng, HOU Xiaojuan, ZHANG Liaoyuan, et al. Graphene/PDMS biomimetic ginkgo leaf microstructure flexible piezoresistive pressure sensor[J]. Micronanoelectronic Technology, 2020, 57(3): 198-203. (in Chinese)
- [20] 付如民. 基于丙烯酸柔性压电材料的制备及其在可穿戴传感器上的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [21] 杜青, 李刚, 胡杰, 等. 基于 C-PDMS 介质层的柔性电容式传感器研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(2): 1-3, 8.  
DU Qing, LI Gang, HU Jie, et al. Flexible capacitive sensor based on C-PDMS composites as dielectric layer[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(2): 1-3, 8. (in Chinese)
- [22] J A S, S E F, B S S, et al. Bio-compatible piezoelectric material based wearable pressure sensor for smart textiles[J]. Smart Material Structures, 2022, 31(12): 125015.
- [23] RAJANNA R R, SRIRAM N, VITTAL P R, et al. Performance evaluation of woven conductive dry textile electrodes for continuous ECG signals acquisition[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(3): 1573-1581.
- [24] 汤健, 闫涛, 潘志娟. 导电复合纤维基柔性应变传感器的研究进展[J]. 纺织学报, 2021, 42(5): 168-177.  
TANG Jian, YAN Tao, PAN Zhijuan. Research progress of flexible strain sensors based on conductive composite fibers[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(5): 168-177. (in Chinese)
- [25] 胡锦涛, 李龙, 董子靖. 碳纳米材料在 PU 纱线基柔性应变传感器中的应用[J]. 化工进展, 2023, 42(2): 872-883.  
HU Jinjian, LI Long, DONG Zijing. Application of carbon nanomaterials in PU yarn-based flexible strain sensors[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(2): 872-883. (in Chinese)
- [26] 范梦晶, 吴玲娅, 周歆如, 等. 镀银聚酰胺 6/聚酰胺 6 纳米纤维包芯纱电容传感器的构筑[J]. 纺织学报, 2023, 44(11): 67-73.  
FAN Mengjing, WU Lingya, ZHOU Xinru, et al. Construction of capacitive sensor based on silver coated polyamide 6/polyamide 6 nanofiber core-spun yarn[J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(11): 67-73. (in Chinese)
- Chinese)
- [27] 穆琪琪. 基于有机半导体的柔性温度传感器有源层设计及优化[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.
- [28] LI Z H, XU K, PAN Y S. Recent development of supercapacitor electrode based on carbon materials[J]. Nanotechnology Reviews, 2019, 8(1): 35-49.
- [29] 何晓霞, 宋向荣, 宋慎群, 等. 碳纳米管材料在服装行业的应用[J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(1): 18-20.  
HE Xiaoxia, SONG Xiangrong, SONG Shenqun, et al. Application of carbon nanotubes in clothing industry[J]. Chemical Fiber and Textile Technology, 2022, 51(1): 18-20. (in Chinese)
- [30] 吕玉环. 基于石墨烯和 MXene 的活性层结构与压阻性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- [31] 赵连家. 聚合物/MXene 复合材料制备及其柔性传感性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [32] 张凡, 胡钦南, 宋玲玲, 等. 可拉伸、自修复 Janus 水凝胶薄膜用于柔性传感器的研究[J]. 现代化工, 2023, 43(10): 160-166, 173.  
ZHANG Fan, HU Qinnan, SONG Lingling, et al. Stretchable, self-healing Janus hydrogel film for flexible sensors[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(10): 160-166, 173. (in Chinese)
- [33] 白龙, 金勇, 商翔, 等. 胶原基离子水凝胶的制备及其在传感领域的应用研究[J]. 皮革科学与工程, 2022, 32(5): 1-5.  
BAI Long, JIN Yong, SHANG Xiang, et al. Preparation of collagen-based ionic hydrogel and its application in sensing field[J]. Leather Science and Engineering, 2022, 32(5): 1-5. (in Chinese)
- [34] 王凤鸣. 基于二维 MoS<sub>2</sub> 的柔性应力传感器构建、改性以及应用研究[D]. 江门: 五邑大学, 2023.
- [35] 刘皓, 李斌, 罗丹, 等. 可监测动脉血压波形的超声阵列柔性传感器[J]. 天津工业大学学报, 2023, 42(6): 74-83.  
LIU Hao, LI Bin, LUO Dan, et al. Ultrasonic array flexible sensor for monitoring arterial blood pressure waveform[J]. Journal of Tiangong University, 2023, 42(6): 74-83. (in Chinese)
- [36] 董泽宇, 沙东勇, 凌小峰. 一种无电池自供能的无线手势识别智能手套的实现[J]. 仪表技术与传感器, 2023(8): 49-55, 119.  
DONG Zeyu, SHA Dongyong, LING Xiaofeng. Implementation of battery free self-powered wireless gesture recognition intelligent glove[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(8): 49-55, 119. (in Chinese)
- [37] 王金凤, 龙海如. 基于导电纤维针织物的柔性传感器研究[J]. 纺织导报, 2011(5): 76-79.  
WANG Jinfeng, LONG Hairu. Research on flexible sensors based on knitted fabric with conductive fiber[J]. China Textile Leader, 2011(5): 76-79. (in Chinese)