



“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材
纺织科学与工程一流学科建设教材

纺织敏感材料与 传感器



ANGZHI
MINGAN CAILIAO YU
CHUANGANQI

胡吉永 ○ 主 编
张天芸 杨旭东 郎晨宏 ○ 副主编



中国纺织出版社有限公司

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位



“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材

纺织科学与工程一流学科建设教材

纺织敏感材料与传感器

胡吉永 主 编

张天芸 杨旭东 郎晨宏 副主编



中国纺织出版社有限公司

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

内 容 提 要

本书围绕纺织敏感材料与不同类别传感器的开发及应用系统集成等多方面内容分章编写,全面系统介绍纺织敏感材料及其传感系统设计、制备、使用中的理论问题、共性问题、热点问题和前瞻性问题,涉及纺织敏感材料的概念和内涵,典型纺织敏感材料的设计和基础纺织加工技术,传感系统的封装技术以及性能评价技术等,重点介绍基本纺织材料如何结合纺织加工技术设计、开发相关纺织敏感材料和传感器件。采用自下而上的方法阐述纺织敏感材料及传感器的制备和应用。本书内容丰富、新颖、先进,具有一定的广度与深度。

本书可作为学生、科研人员的学习基础用书和教学用教材,对从事智能纺织品及其相关开发设计的工程技术人员及学者具有一定的启发性。

图书在版编目 (CIP) 数据

纺织敏感材料与传感器/胡吉永主编. --北京:
中国纺织出版社有限公司, 2019. 11
“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材. 纺织
科学与工程一流学科建设教材
ISBN 978-7-5180-6622-3

I. ①纺… II. ①胡… III. ①触觉传感器-应用-纺织纤维-智能材料-高等学校-教材 IV. ①TS102

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 190296 号

策划编辑: 符 芬 责任编辑: 陈怡晓 符 芬
责任校对: 王蕙莹 责任印制: 何 建

中国纺织出版社有限公司出版发行
地址: 北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码: 100124
销售电话: 010—87155894 传真: 010—87155801
<http://www.c-textilep.com>
E-mail: faxing@c-textilep.com
中国纺织出版社天猫旗舰店
官方微博 <http://weibo.com/2119887771>
三河市宏盛印务有限公司印刷 各地新华书店经销
2019 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
开本: 787×1092 1/16 印张: 26.75
字数: 482 千字 定价: 88.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社图书营销中心调换

随着物联网 (IoT) 和增强现实 (AR)、信息物理系统、人工智能 (AI)、区块链或边缘计算等新兴技术的兴起,基于可穿戴设备的智能织物和 IoT 的服装通过协调功能和时尚愉悦感而对人类产生巨大影响。智能服装正在时尚、工程、互动、用户体验、网络安全、设计和科学之间寻求一种平衡,以重造能够预测人们需求和愿望的技术。如今,纺织品和电子产品的迅速融合,使得传感器能够无缝、大规模地集成到纺织品中,可以与智能手机通信,处理心率、体温、呼吸、压力、运动、加速度甚至激素水平等生物特征信息。智能纺织的潜力预示着零售业将迎来一个新时代,把人與人、人与机器的连接和互动带到一个新的高度。

目前,一些纺织院校在生物医用纺织材料设计方向开设了“智能纺织材料与传感器”,在纺织工程专业开设了“智能纺织品”课程。但是,目前没有系统、深入地介绍智能纺织材料与传感器的书籍,相关著作多以研究论文汇集成书,不便于学生从设计原理、制备方法、评价方法和应用等方面系统学习,不能满足相关教学的需要。本教材编写的目的在于整合各个领域对智能纺织的认识,成为学生、学者和工程技术人员的学习基础。作者整理了多年来在智能纺织材料方面进行科研与教学的经验,并查阅总结国内外大量相关的新成果与新技术,结合多位作者在智能纺织材料及相关技术开发中的经验总结,全面系统介绍纺织敏感材料及其传感系统设计、制备、使用中的理论问题、共性问题、热点问题和前瞻性问题,对从事相关开发设计的工程技术人员及学者具有一定的启发性。

随着可穿戴技术的深入发展,纺织电子及传感器件引起多个学科及行业的广泛关注。在各个领域的不同研究,诸如纺织、电子工程、模式识别、服装、计算机科学和人机交互,形成了对纺织敏感材料及传感器的多样化认识。虽然各个领域的相应认识对推动智能纺织向更高水平发展十分重要,但缺少系统讲述相关知识的专业书籍。为了帮助其他学科及行业专业技术人员全面了解智能纺织材料及传感器件的纺织成型、加工、评价技术,迫切需要系统介绍纺织敏感材料及传感系统设计的专业教材,满足相关工程技术人员及学者的学习。

本书围绕纺织敏感材料与不同类别传感器的开发及系统集成等多方面内容分章编写,涉及纺织敏感材料的概念和内涵,典型纺织敏感材料的设计

和基本纺织加工技术，传感系统的封装技术以及性能评价技术等，重点讲授基本纺织材料如何结合纺织加工技术设计、开发相关纺织敏感材料和传感器件。总体而言，采用自下而上的方法讲授纺织材料敏感材料及传感器的制备和应用。本书分为十二章，第一章讲述纺织敏感材料的历史和来源，纺织材料基本形式及加工工艺方法；第二章简要介绍传感器的基本知识，为后续纺织传感器的设计开发打基础，第三至第九章分别讲述智能纺织品开发涉及的主要材料，以及这些材料在典型传感器开发中的应用，第十至第十二章讲述构成智能传感系统的组装元件和其基本特性和应用实例。本书内容丰富、新颖、先进，具有一定的广度与深度。

第一至八章由东华大学纺织学院胡吉永、杨旭东共同编写，第九至十章由兰州理工大学机电工程学院张天芸、泉州师范学院纺织与服装学院郎晨宏共同编写，第十一至十二章由胡吉永、张天芸共同编写，由胡吉永统稿。本书在编写过程中，还得到东华大学纺织学院领导及张丽娜、孙红月、王婷婷、洪虹等研究生的支持，在此表示感谢。同时，向本书参考资料作者致以诚挚谢意。

限于编者的水平，本书内容可能存在不够确切、完整和疏漏之处，热忱欢迎读者提出批评意见。

编者

2019年7月

第一章 引言	1
第一节 发展背景	1
第二节 纺织纤维材料的特点及属性	2
一、纺织品（服装）的特点	2
二、纺织材料及属性	3
第三节 智能纺织材料	3
一、智能纺织材料的内涵	3
二、智能纺织材料的外延	5
三、智能纺织材料特性	7
第四节 纺织材料及结构成型	8
一、长丝	8
二、纱线	10
三、绳索	13
四、二维片状材料	14
五、三维立体纺织材料	16
六、涂层技术	19
七、印制技术	20
八、刺绣加工技术	29
九、固化烧结技术	32
第五节 纺织传感器技术	33
一、发展历史	33
二、加工技术	34
第六节 应用领域	37
一、医疗卫生保健	37
二、电子电工	39

三、运动器材和服装	39
四、数字化多媒体娱乐	39
五、工业工程设施	40
六、军事安全设施	40
第七节 发展潜力与趋势	40
一、发展动力	40
二、智能纺织品市场	42
三、技术难题和挑战	43
第八节 本章总结	45
第二章 纺织传感器基础	48
第一节 传感器的基本概念	48
一、传感器的定义	48
二、传感器的分类	49
第二节 传感器的主要性能指标	50
一、传感器的静态性能指标	50
二、传感器的动态特性指标	54
三、传感器的标定	57
第三节 传感器封装	57
第四节 智能传感器系统	57
第三章 导电材料与导电纺织材料设计	59
第一节 材料的电学性能	59
一、半导体	60
二、导体	61
第二节 导电材料	63
一、本征导电材料基纺织品	64

二、导电聚合物纤维	65
三、纳米碳基导电材料	72
四、高导电复合材料	77
五、导电油墨	79
六、导电水凝胶	82
第三节 导电纺织材料的加工技术	83
一、导电纤维/纱线	84
二、导电织物	88
第四节 本章总结	93
第四章 力敏材料与电阻/电容/电感传感器设计	95
第一节 电容式传感器件	95
一、传感原理	96
二、测量电路	100
三、纺织电容传感器	102
第二节 变电阻式传感器件	111
一、传感原理	111
二、测量电路	112
三、纺织变电阻式传感器	114
四、典型器件制备原理与性能评价	121
第三节 电感式传感器	126
一、传感原理	126
二、测量电路	128
三、纺织基电感式传感器	129
第四节 本章总结	131
第五章 光敏感纺织材料与传感器设计	133

第一节	光敏感纺织材料	133
一、	材料的光学性能	133
二、	光学传感特性	137
第二节	光纤材料与传感器设计	139
一、	光纤材料	139
二、	光子晶体纤维	148
第三节	光电纺织材料与传感器	151
一、	光电纺织材料	151
二、	传感器设计与评价	152
第四节	光致变色材料	156
一、	光致变色机理	156
二、	光致变色材料分类	156
三、	光致变色纤维及织物	160
第五节	光化学传感器	165
第六节	发展趋势	166
第六章	湿敏感纺织材料与传感器设计	169
第一节	湿敏材料	169
一、	湿敏纺织材料的传感特性	169
二、	湿敏材料的分类	171
三、	纺织品湿度传感器设计的织物选择	175
第二节	高分子湿敏传感器	177
一、	电阻型湿度传感器	177
二、	电容型湿度传感器	179
第三节	湿敏变色材料与传感器	184
一、	湿致变色传感器的工作原理	185
二、	湿致变色纺织敏感材料	185

三、湿致变色纺织传感器设计	186
第四节 本章总结	187
第七章 温敏纺织材料与传感器设计	190
第一节 温敏纺织材料	190
一、材料的温度特性	190
二、温敏纺织材料的分类及传感器	190
第二节 电阻式温度传感器	191
一、金属热电阻传感器	191
二、热敏电阻传感器	191
三、热电阻的测量电路	192
第三节 热电偶传感器	193
一、热电偶的工作原理	193
二、热电极材料	195
三、热电偶结构	196
第四节 半导体热敏传感器	197
一、热敏二极管	197
二、热敏晶体管	197
第五节 电阻式纺织温度传感器设计	198
一、织物基温度传感器的制备	198
二、织物基温度传感器的性能	201
三、温度传感织物设计	202
第六节 热致变色材料与传感器	214
一、热致变色传感器的工作原理	214
二、热致变色纺织敏感材料	215
三、基于热致变色敏感材料的传感器设计	218

第七节	发展趋势	219
第八章	生物敏感纺织材料与传感器设计	221
第一节	生物敏感纺织材料	221
一、	生物敏感材料的传感特性	222
二、	生物传感器的刺激因素	224
第二节	电化学生物传感器	231
一、	电化学生物传感器结构	231
二、	电化学生物传感器实例	232
第三节	半导体生物传感器	236
一、	半导体生物传感器结构	236
二、	纺织半导体生物传感器实例	238
第四节	酶敏感纺织材料与传感器	243
一、	酶电极传感器的工作原理及分类	243
二、	酶传感器的发展	244
第五节	其他生物敏感纺织材料与传感器	246
一、	离子选择电化学敏感材料与传感器	246
二、	pH 敏感材料与传感器	247
三、	仿生传感器	249
四、	可穿戴电传感测量传感器	249
第六节	发展趋势	250
第九章	能量收集材料与传感器设计	253
第一节	概述	253
第二节	压电纺织材料与传感器设计	255
一、	压电传感器	255
二、	压电敏感纺织材料	257
三、	压电式纺织传感器设计	259

第三节	摩擦发电纺织材料与传感器设计	263
一、	摩擦发电机 (Triboelectric Generator)	263
二、	摩擦发电纺织敏感材料	266
三、	摩擦发电式纺织传感器设计	266
第四节	热电纺织材料与传感器设计	273
一、	热电传感器的工作原理	273
二、	热电敏感纺织材料	275
三、	热电式纺织传感器设计	278
第五节	太阳能电池 (Solar Cell)	283
一、	太阳能电池的工作原理	283
二、	太阳能电池的纺织敏感材料	285
三、	典型纺织结构的太阳能电池设计	287
第六节	发展趋势	291
第十章	传感系统能量存储器件	297
第一节	概述	297
第二节	能源器件的基本概念	299
一、	超级电容器	299
二、	电池	302
三、	纺织基能源器件的评价	304
第三节	纺织基能量存储元件	315
一、	纺织基储能器件用柔性电极	315
二、	纺织基储能器件用电解质	316
三、	纺织基储能器件用隔膜	316
第四节	纺织结构储能器件的设计	317
一、	一维结构储能器件的设计	319

二、二维结构储能器件的设计	323
第五节 发展趋势	329
一、纺织储能器件的柔性化和可伸缩性	330
二、纺织储能器件机械性能和储能性能的平衡及 使用稳定性	330
三、纺织储能器件的轻量化及连续生产	330
四、纺织储能器件在人体上的应用及生物相容性	330
第十一章 传感系统信号传输器件	335
第一节 引言	335
第二节 纺织电力电子元件之间的互联	335
一、发展现状	335
二、互联材料	336
三、相关的互联特性和表征	342
四、连接器	352
五、电路布线技术	355
六、纺织传输线设计实例	364
第三节 纺织天线	368
一、纺织天线特性	368
二、纺织天线设计原理	368
三、纺织无线通信天线制备技术	370
第四节 发展趋势	376
第十二章 传感系统的信息交互及其他部件	379
第一节 织物输入键盘	379
一、工作原理	379
二、织物键盘的开发现状	380

三、织物键盘的设计	382
第二节 触控装置	383
一、投射式电容触摸垫	386
二、表面式电容触摸垫	387
三、电容式织物触摸垫的原理分析及制备	393
四、电容式织物触摸垫的影响因素	396
五、织物触摸垫的触控性能评估	399
第三节 其他部件	407
一、晶体管	407
二、发光二极管	409
第五节 发展趋势	411

第一章 引言

第一节 发展背景

纺织敏感材料广义上属于一种智能材料。智能材料被选为“改变 21 世纪人类生活的 21 项革新”之一，具有超高的实用性与适用性。纺织敏感材料是具备纺织纤维及纤维集合体特征的一类智能材料，是智能纺织品开发的基础。目前，智能纺织品技术正向高性能、高技术水平、大规模产业化方向发展，智能纺织品的技术研发、服装设计和操作便利性设计等方面不断满足人类对智能产品的需求。

智能纺织材料融纺织、电子、医学、计算机、物理、化学等多学科知识于一体，可感知环境变化，并依此做出反应，在提高生活质量，改善劳动条件，满足特种行业需要等方面发挥着重要作用。近年来，智能调温、形状记忆、智能变色、电子信息等智能纺织材料正从戴向穿及更宽的领域发展。从不同角度探讨柔性智能可穿戴技术实现的可能性、途径和发展方向，破解传统外挂式可穿戴产品的发展瓶颈，需要来自纺织、材料、能源、电子、信息等领域的专家学者共同参与，围绕智能纤维材料，基于纺织品的能源供给与存储系统、传感器的设计与制造、电子技术与纺织品融合创新的技术路径、可穿戴服装与服装设计、服装工程的协同等内容进行跨界讨论、交流与合作。

智能纺织品是新兴可穿戴技术的发展方向，无论在消费者群体中还是研究领域均受到特别青睐，以致近几年获得大量研发和创新，是纺织服装行业未来的发展方向和经济增长点。这归因于诸如医疗、保健、运动、时尚、娱乐、军事及安全防护行业对可穿戴电子产品的日益增加的需求，图 1-1 给出了满足人的各种潜在需要的智能纺织品。在智能纺织品领域，应用纺织及电子工程领域的生产技术实现这两种不同材料之间的融合。

传感器是智能纺织品的关键部件，可在生产纺织品的各个阶段构建。在材料方面，如智能纤维；在纺织结构方面，如机织或针织图案。纺织传感器也可看作简单交互式电子元件。虽然应用电子工程到纺织行业能保证电子元件工作，但应用纺织生产技术到电子行业仍存在挑战。然而，正是因为纺织加工的适应性，才具有无限创新潜力。这种潜力不仅包括生产方法，也涉及其与数字界面交互的方法及这些界面的整体美观性。

电子纺织品，是一种集成纺织敏感材料的新兴技术，可穿戴、柔软、舒适，有时甚至对大面积的传感系统具有广泛的潜在影响，有望在医疗、通信和娱乐、体育和太空、安全和监控等领域带来革命性的应用。就智能纺织品发展的现阶段而言，使用传感器和导电功能纺织品与周围环境或用户的交互通常是智能纺织品的先决条件，因此，这类纺织品也常被称为电子纺织品，它已从初级的传输导线逐渐发展成为人体功能的一部分，如图 1-2 所示。它

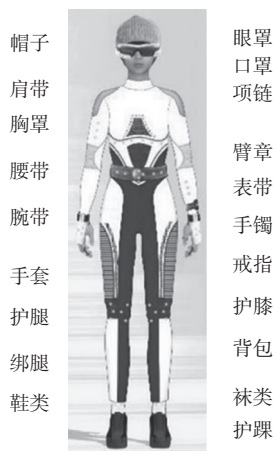


图 1-1 满足人类各种潜在需要的智能纺织品

提供了在远大于硅片的基片上生产分布式电子系统的潜力。然而，目前，电子纺织品的研究大多集中在开发人体穿戴或可穿戴技术上，而大多数可穿戴产品中检测和传输数据的电子传感器是由硬且不易弯曲的材料制成，这将限制穿戴者的自然活动和所收集数据的准确性。相应地，消费者仍在接近智能纺织品时保持谨慎，主要是因为它们包含易碎、易损的金属基材料，这造成更低的效率或中断。在研发领域，总体趋势是逐渐在聚合物及纤维层面集成越来越多的电子元件于纺织结构，而不是把纺织品仅仅当作附载传感器、输出设备及印刷电路板的基底，以研发具有新颖智能功能的纤维基结构，实现可穿戴纺织技术的创新和突破性应用设计。

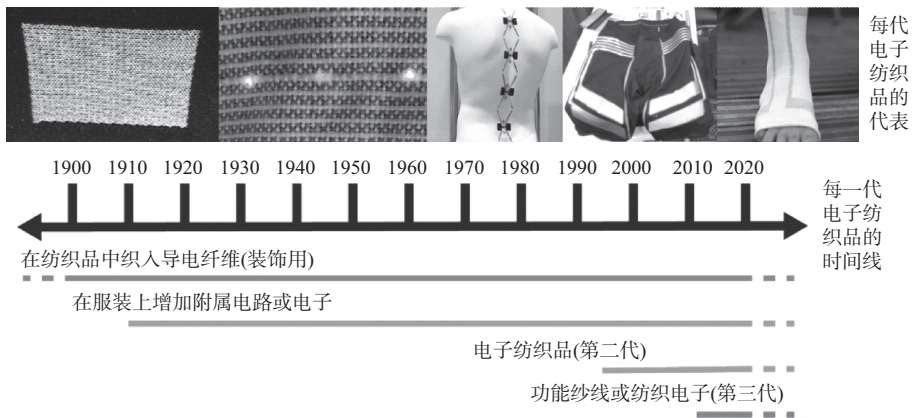


图 1-2 电子纺织品发展时间表及未来的发展趋势。

虽然智能纺织品涉及各类功能材料及纺织敏感材料，本书将主要介绍应用纺织加工技术制备具有传感功能及系统的智能纺织品，并举例说明工业化纺织加工工艺如何应用于设计生产纺织传感器及传感系统的主要相关元器件等。

第二节 纺织纤维材料的特点及属性

千百年来，尽管纺织服装在材料和制造技术上有了巨大的进步，但其两个基本功能——身体防护和身体装饰功能并没有改变，并且一直很好地服务于人类。智能纺织材料及传感器本质上应是在基本功能基础上增加的第三个功能，最好具备或不显著弱化纺织品及纺织材料的基本特点。

一、纺织品（服装）的特点

纺织品及服装之所以在这么长的历史时期内能一直很好地服务于人类，是因为下面八个最显著特点，以满足服装两大功能的相关属性。

(1) 足够的伸缩性和弹性。为了保证人们正常活动，服装必须容易拉伸以适应人体的运动。

(2) 质轻合体。服装应使穿着者显得优雅，至少不致看起来像“铁皮人”。

(3) 透气性和舒适性。必须维持身体舒适度，使人们的皮肤能够“呼吸”，分泌的汗液被导出和蒸发。

(4) 保暖性。服装的首要功能是在寒冷的天气帮助人们御寒。

(5) 皮肤的安全性和接触舒适性。衣物在任何情况下都应避免对身体和皮肤造成任何难以忍受的感觉或潜在危险。

(6) 翻新能力。服装必须具有一定强度和耐久性，是可反复清洗/清洁的。

(7) 审美考虑。服装需要经过设计、印花、染色等工艺以使其赏心悦目。

(8) 成本。价格尽管不是一种商品的固有特性，但毋庸置疑是决定消费者接受度及产品是否能成功售出的重要因素。

二、纺织材料及属性

纺织材料可以大规模快速生产，价格合理并不断拓展功能性，主要有如下特点。

(1) 大部分用于常规服装的纤维为高分子聚合物，故质轻，具有可加工性，能够大规模加工成纱线、织物，最终成为服装。因此，可以以合理的成本实现上述的质轻、柔软和耐久性。

(2) 由纤维、纱线、织物到服装，采用了多级递增结构，以形成具有不同尺寸毛细孔的多孔材料，实现亲水性、可染性、透气性和舒适性。

(3) 摩擦力是服装中唯一的“黏合剂”，通过加捻、缠结、交织或编织以同时保证整个结构的整体性和内部部件间的可移动性两个相互矛盾的性能。纤维网由于摩擦力保持足够的完整性，使得包括强度、柔韧性、拉伸、合体性等在内的看似相反的性能能够和谐共存。

上述三个基本要求（单个或多个组合）就确定了目前纺织服装的形式。如果试图背离它们，必然会导致纺织服装性能的严重恶化，极大地降低消费者对纺织服装产品的认同度。从这种意义上讲，如果智能纺织敏感材料及传感器的应用目标是近人纺织产品，则应该满足纺织服装及纤维的基本属性及要求。

第三节 智能纺织材料

一、智能纺织材料的内涵

一般认为，智能是相对人和动物而言的，是一种获取、存储知识并运用知识解决问题的能力。顾名思义，所谓智能材料与结构即一种对所给的特别的刺激能进行判别，并按预定方式做出反应的材料。这样的材料可以是自然产生的或由人工引入多种性能产生的智能系统，在一定意义上具有感知功能、信息处理功能和执行功能，即具有获取、识别、处理和执行信息的能力，并具有自动调解、自诊断、自适应、自修复、损伤抑制、寿命预报等能力，表现出动态的自适应性。

师昌绪院士主编的《材料大辞典》中对于智能材料（Smart Materials）的解释为模仿生命系统同时具有感知和驱动双重功能的材料。即不仅能感知外界环境或内部状态所发生的变化，还能通过材料自身或外界的某种反馈机制，实时地将材料的一种或多种性质改变，做出所期望的某种响应的材料，又称机敏材料。感知、反馈和响应是智能材料的