

柔性应变传感针织物的研究进展

张可欣,李政,牛艳,刘玮

(上海工程技术大学 纺织服装学院,上海 201620)

摘要: 针织物具有良好的延伸性和弹性,适于制备柔性应变传感器。对近几年国内外电阻式柔性应变传感针织物的研究进行综述,总结针织物柔性传感器的制备材料和方法,包括基于导电金属材料、基于导电高聚物、基于纳米碳材料的传感针织物,并研究分析组织结构对织物传感性能的影响。该研究为应变传感针织物的材料选择和结构设计提供参考。

关键词: 应变传感;针织物;柔性;传感器;电阻;研究进展

中图分类号: TS 186

文献标志码: B

文章编号: 1000-4033(2021)12-0009-05

Research Progress of Flexible Strain Sensing Knitted Fabrics

Zhang Kexin, Li Zheng, Niu Yan, Liu Wei

(College of Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Knitted fabric has excellent elongation and elasticity, which is suitable for preparing flexible strain sensor. The research on resistive flexible strain sensing knitted fabrics at domestic and overseas in recent years is reviewed. The preparation methods and properties of flexible strain sensing knitted fabrics are summarized, which will provide reference for material selection and structural design of strain sensing knitted fabrics.

Key words: Strain Sensing; Knitted Fabric; Flexible; Sensor; Resistance; Research Progress

传感器是能将被测数据的信号通过自身的变化转化为电信号或其他所需形式的信息并输出的检测装置,是智能系统的重要单元。近年来,随着智能纺织品的发展,柔性传感织物也逐渐成为研究热点。针织物由于具有较好的延伸性和弹性,在柔性传感尤其是应变传感领域的应用方面有着极大的优势,可通过与金属纤维、导电高分子或纳米碳材料等导电介质相结合制备基于电阻变化的柔性应变传感织物^[1]。电阻式柔性应变传感针织物(针织物传感器)在拉伸形变过程中,导电纱线之间接触电

阻或纱线自身会产生电阻变化,由此可将织物所受到的拉力或应变转化为电阻变化信号得以输出,从而用于对人体呼吸、脉搏或活动过程的监测^[2]。

本文针对电阻式针织物柔性应变传感器,从制备材料和方法角度对近几年柔性传感针织物的研究现状进行综述,为应变传感针织物的材料选择和结构设计提供一定参考。

1 针织物柔性传感器的制备材料及方法

传感针织物通常由导电纱线制备,通过拉伸过程中相邻导电纱

线接触电阻的变化而实现传感功能。常用导电纱线主要有基于金属材料、导电高聚物和导电碳材料的纱线,制备方法有涂覆、电镀及与其他纤维进行编织等。

1.1 基于导电金属材料的传感针织物

金属导电纤维具有导电性能、耐腐蚀性、柔韧性、导热性优良性质^[3],被广泛用于针织物传感器。金属纤维可以直接作为纱线,也可以与普通纤维混纺作为导电纱线。常见的金属纤维有镀银纤维、不锈钢丝、铜纤维、铜丝^[4]等。其中镀银纤维、镀铜纤维因基体为锦纶,容

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52503120)。

作者简介: 张可欣(2002—),女,本科生。主要从事智能纺织品的研究。

通讯作者: 刘玮(1986—),女,副教授。E-mail: wliu@sues.edu.cn。

易编织;不锈钢纤维丝及铜丝编织难度较大,在编织途中存在易断裂、易脱圈等情况^[5],其可编织性可通过与其他服用纤维如聚酯纤维^[6]或棉纤维^[7]混纺而改善。

李煜天等^[6]采用不锈钢纤维与涤纶混合编织成拉伸传感针织物,研究了影响拉伸传感性能的因素,织物电阻变化率随着伸长率的增大而增大,且纵向拉伸更加明显。Cristina et al^[8]采用了 20% 不锈钢与 80% 的聚酯纤维混纺纱线制备了纬平针单向拉伸传感针织物,研究了机械预处理试验对导电纱针织物电性能的影响。在多次循环拉伸后,织物传感性能随着线圈结构的变化(如图 1 所示^[8])发生改变,在低循环次数下,织物灵敏度逐渐降低,最多至初始值的 20 倍,随着循环拉伸次数的增加,电阻率变化趋于稳定。谢娟^[7]采用不锈钢纤维和棉纤维混纺纱线在电脑横机上编织成针织物传感器,研究在不同拉伸条件下的传感性能,当应变小于 5% 时传感灵敏度可达 18.00,应变大于 5% 之后,随着织物的进一步拉伸,电阻变化不明显。

相较于不锈钢混纺纱,金属涂覆纱线具有更优的导电性,所制备的传感针织物具有更加优异的传感性能。韩潇等^[9]将镀银锦纶导电纱线作为面纱编织成添纱组织制备针织物传感器,研究结果表明,织物传感区域的横列数和纵行数对其传感性能具有显著影响,横列数越少、纵行数越多时,织物的传感系数越高,当横列数和纵行数分别为 15 列和 240 行时,传感器的灵敏度达到最大值 47.00,且线性度也较好,在 40 次重复拉伸过程中,电阻变化范围没有明显波动。郭秋晨等^[10]采用不同线密度镀银锦纶丝作为面纱编织了添纱组织

传感针织物,发现当应变小于 15% 时,电阻与应变均呈线性关系,由于不同线密度纱线的电阻率有差异,使其传感织物的灵敏度与纱线线密度紧密相关。刘婵婵等^[11]采用圆机编织添纱组织织物并将其制作成袖套,测试了人体实际穿着时肘部弯曲过程中织物电阻的变化,测试结果显示:以 77.78 dtex/24 f 的锦氨包覆纱和 44.44 dtex 的裸氨组合作为地纱,镀银锦纶纱作为面纱,横密为 85 纵行/5 cm,纵密为 110 横列/5 cm 的传感针织物传感性能最优,其线性度为 0.98,灵敏度为 3.20,在 100 次以内的弯曲变形中电阻变化范围小。Yutian et al^[12]以 4.44 tex(40 D)聚酰胺纤维及氨纶包芯纱为地纱,4.44 tex 聚酰胺镀银纱线作为面纱,编织浮线添纱组织传感针织物(如图 2 所示^[12]),用以监测人体行走步态,结果显示传感织物灵敏度与稳定性良好。

由于针织物是由线圈相互穿套而形成的织物结构,使金属纤维在编织过程中具有很大难度,常采用镀银锦纶纱、镀铜锦纶纱和不锈钢混纺纱制备传感织物,其导电性能优异,灵敏度和线性度良好。但其传感区域的纵行数和横列数对织物的传感性能影响较大,因此在试验中,应根据不同的实际需求,选取最佳的纵行数和横列数,以达到最优的效果。

1.2 基于导电高聚物的传感针织物

导电高聚物如聚吡咯、聚噻吩和聚苯胺等常作为导电介质制备传感针织物,导电高分子可通过原位复合或浸涂等方式沉积在纱线或织物表面,也可通过静电纺丝或湿法纺丝等方法直接制备导电高分子纱线进而制备传感针织物。

林大鹏^[13]通过掺杂离子液体的静电纺丝方法制备了高电导率

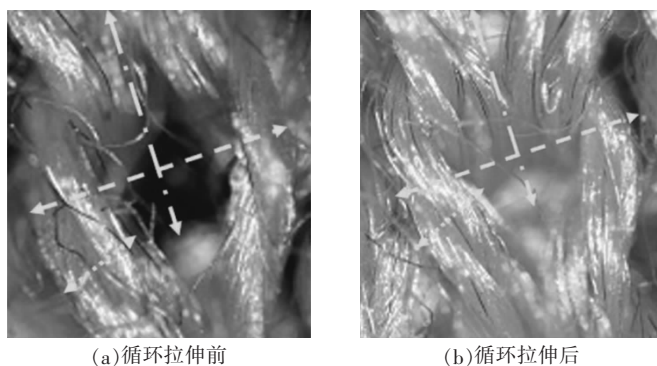


图 1 不锈钢混纺纱针织物线圈结构

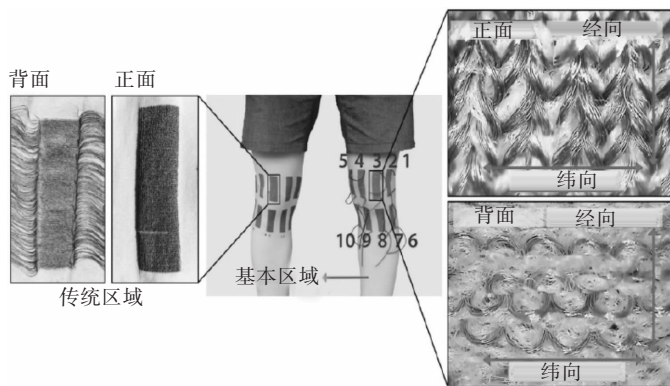


图 2 镀银纱线传感针织物用于监测人体行走步态变化

的聚乙烯二氧噻吩(PEDOT)纤维,并将纤维做成绞线结构。掺杂了离子液体(2%)所制备的绞线结构相比于未掺杂纤维(0.8×10^{-5} S/cm)表现出更高的电导率(1.8×10^{-4} S/cm),且在受外力拉伸时(拉伸至 35%)电阻呈线性变化,重复性能好,可被用于拉伸传感器。Seyedin et al^[14]将聚氨酯(PU)与导电聚合物聚乙烯二氧噻吩、聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)共混通过湿法纺丝制备了导电纱线,并将多股导电纱线通过与氨纶纱线合并编织成针织物(如图 3 所示^[14]),用以监测人体膝部活动。其结果显示 4 股导电纱线与单根氨纶合并编织的针织物传感性能较好,尽管其传感系数较低,但在较高的应变范围(160%)内弹性回复率好且具有稳定的电阻变化。洪剑寒等^[15]将聚苯胺(PI)通过原位聚合方法沉积在超高分子量聚乙烯长丝纱表面,并将该纱线制备了筒状纬平针织带,研究织物的应变传感性能,发现织物在应变小于 20%时具有较高的灵敏度,传感系数最高可达 32.00,且具有较好的传感稳定性。

将导电聚合物通过原位复合或浸渍等方式附着在针织物表面,也可赋予织物应变传感性能。韩潇等^[16]以涤纶针织物为基材采用原位聚合法制备涤纶、聚苯胺复合导电织物,该织物在纵行方向表现出较好的传感性能,在对织物的循环拉伸过程中,拉伸时灵敏度最大为 5.98,回复时灵敏度最大为 16.73。Xiao et al^[17]通过掺杂二氧化钛纳米颗粒在原位聚合涤纶、聚苯胺导电针织物的基础上获得了具有聚水性能的应变传感针织物(如图 4 所示^[17]),其应变传感系数约为 2.00。Dandan et al^[18]将聚吡咯原位聚合于棉针织物表面,获得了电导率为

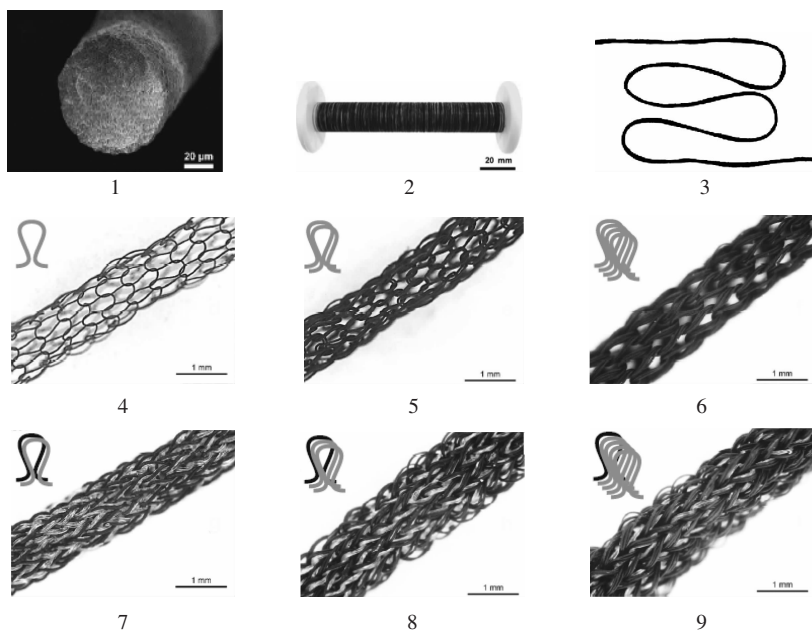
$303 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 的导电织物,该织物在应变为 15%以上时传感系数可达 2.29,且在施加低电压条件下能够产生焦耳热量。

相比于金属材料,导电高聚物具备了质地轻薄、柔软等优点,在结构设计上灵活多变;但其导电性能较弱,通过原位聚合或浸渍方式直接与织物复合所获得的传感织物的结构稳定性并不高。将导电高聚物通过静电纺丝或湿法纺丝制备成导电纱线,再将其经过针织加工成传感织物,将进一步提高其稳定性。

1.3 基于纳米碳材料的传感针织物

除导电高聚物外,碳基纳米材料如纳米碳黑^[19]、碳纳米管^[20]及石墨烯^[21-22]也通过与针织物相结合的方式具备导电和传感功能。其中,石墨烯因具有特殊的化学结构且蕴藏着优异的力、热、光、电等物理性能,其电子迁移速率超快、体积小、表面积大、灵敏度高^[23],在开发新型传感针织物方面具有很大优势。

Guang et al^[21]通过氧化石墨烯还原方法制备了石墨烯涂层针织



注:1.PU-PEDOT:PSS 纱线的扫描电镜图;2.经湿法纺丝后卷装的 PU-PEDOT:PSS 纱线;3.PU-PEDOT:PSS 纱线针织带;4—6.不同股数 PU-PEDOT:PSS 纱线编织针织带的光学纤维镜照片;4.单股;5.双股;6.4 股;7—9.不同股数 PU-PEDOT:PSS 纱线与氨纶纱合并编织针织带的光学显微镜照片;7.单股;8.双股;9.4 股。

图 3 复合导电纱线形貌

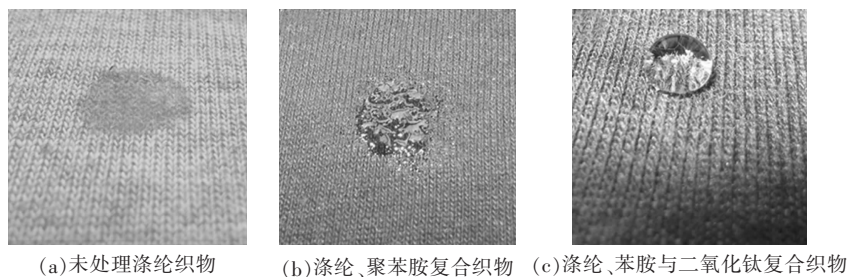


图 4 去离子水液滴在织物表面的形态

结构传感器,其制备方式如图 5 所示。该传感针织物具有分段应变传感的特性,其传感稳定性好、灵敏度高,其在 10%应变范围内的应变传感灵敏度可达 18.50,能够对腕部弯曲扭转等动作进行检测。刘咏梅等^[22]将石墨烯织带作为基材复合于弹性针织面料上,发现当伸长率小于 10%时,柔性石墨烯传感带的电阻增长速率较快,灵敏系数可达 6.0 以上,而当伸长率超过 10%以后,电阻变化较小,敏感度降低。碳纳米管在使用过程中,容易产生团聚效应,邹梨花等^[20]将碳纳米管和聚苯胺进行复合开发了一种碳纳米管聚苯胺涂层针织物应变传感器的制备方法,该方法较好地弥补了聚苯胺在中性和碱性环境中导电性差和碳纳米管分散性差、容易团聚的缺陷。

2 组织结构对织物传感性能的影响

针织物的织物结构决定了织物中线圈的形态,对其传感性能有一定程度的影响。纬平针、罗纹等基本组织针织物常作为基体织物,通过与导电高分子或纳米碳材料相结合实现导电以及应变传感功能。其他花色组织如添纱、衬纬组织也被应用于传感针织物的研究,其中采用局部添纱组织利用镀银纱线的导电性制备应变传感针织物逐渐成为研究热点。

李煜天等^[6]以不锈钢纤维作为柔性针织物导电丝,与涤纶、氨纶进行混合,分别编织了纬平针、1+1 罗纹、2+2 罗纹 3 组不同结构的针织物,对其传感性能测试,结果显示纬平针结构和 1+1 罗纹组织具有良好的应变传感性能,拉伸速度对纬平针织物的灵敏度变化影响较大,对 1+1 罗纹织物的影响最小。张莹莹等^[24]采用不锈钢纤维编

织了纬平针、1+1 罗纹、2+2 罗纹针织物,其测试结果显示,纬平针组织的传感灵敏度最高。刘焘等^[25]采用涂碳纤维编织导电针织物,其应变传感性能测试同样显示了纬平针结构优于 1+1 罗纹结构。这是由于纬平针具有较稳定紧密的组织结构,在受到拉伸时,相邻线圈连接处接触点增大,电阻变化明显^[24]。

刘婵婵等^[11]采用镀银锦纶纱线制备了传感针织物,研究了纬平针添纱和 1+1、2+2 假罗纹添纱组织结构对织物传感性能的影响,假罗纹添纱组织电阻变化随应变增大的线性程度较好,而纬平针添纱组织结构具有较高传感灵敏度。王云燕等^[26]选择以结构为 1+1、2+2、2+1 这 3 种假罗纹添纱组织制备传感针织物,发现添纱数越少,纵行数对电阻变化影响程度越大。王刚等^[27](如图 6 所示^[27])以镀银锦纶丝为原料采用局部衬纬组织结构编织传感针织物,其研究结果随着衬纬区域长度的增加,织物传感灵敏度增高,其中衬纬区域长度为 50 mm、衬纬纱线行数为 5 行的组合,可得到灵敏度达 2.90 的传感针织物。

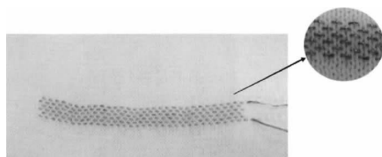


图 6 局部衬纬组织编织传感针织物试样

3 结束语

电阻式应变传感针织物的传感性能主要由传感介质的导电性

以及针织物的组织结构决定。其传感介质既有镀银纱线或不锈钢纤维混纺纱线等金属材料,也有通过原位聚合等方式赋予纱线或针织物导电性能的导电高分子材料,或具有优异电学性能的纳米碳材料,如石墨烯或碳纳米管。传感针织物结构以纬编织物为主,通常采用纬平针、罗纹等基本组织。通过局部纬平添纱组织可以在织物的表面设计传感区域,从而将对织物本身服用性能的影响降到最低。

在对应变传感针织物的设计以及应用研究过程中需要考虑织物的传感性能如灵敏度、电阻变化随应变增加的线性度以及多次拉伸织物蠕变导致的传感稳定性变化,也应考虑到针织物自身的透气性、延伸性和弹性等服用性能是否受影响。

参考文献

- [1]SEYEDIN S. Textile strain sensors: a review of the fabrication technologies, performance evaluation and applications [J].Materials Horizons,2019,6(2):219-249.
- [2]彭晓慧,杨旭东.以织物传感器为基础的呼吸监测方法[J].产业用纺织品,2015,33(2):41-44.
- [3]刘海洋,刘慧英.金属纤维的发展现状及前景展望[J].产业用纺织品,2005(10):1-4.
- [4]蔡倩文,王金凤,陈慰来.纬编针织柔性传感器结构及其导电性能[J].纺织学报,2016,37(6):48-53.
- [5]蔡倩文.基于导电纤维针织物的柔性传感器呼吸监测研究[D].杭州:浙江理工大学,2015.

- [6]李煜天, 缪旭红. 不锈钢/涤纶纤维导电针织物的传感灵敏度[J]. 服装学报, 2016, 1(5): 450-454.
- [7]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.
- [8]CRISTINA I, DONAL S M, SIMON A, et al. Effect of mechanical preconditioning on the electrical properties of knitted conductive textiles during cyclic loading[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(3): 445-460.
- [9]韩潇, 龙海如. 针织物柔性传感器的传感性能探讨[J]. 纺织科技进展, 2014(6): 12-14.
- [10]郭秋晨, 龙海如. 不同材料导电纱线针织柔性传感器的传感性能[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2017, 43(6): 791-797.
- [11]刘婵婵, 缪旭红, 李煜天. 基于针织的肘部弯曲传感器传感性能研究[J]. 丝绸, 2019, 56(12): 16-21.
- [12]YUTIAN L, XUHONG M, LI N, et al. Human motion recognition of knitted flexible sensor in walking cycle[J]. Sensors, 2019, 20(1): 5-10.
- [13]林大鹏. 静电纺丝法制备高电导率PEDOT 微纳米纤维及其特性研究[D]. 山东: 青岛大学, 2015.
- [14]SEYEDIN S, RAZAL J M, INNIS P C, et al. Knitted strain sensor textiles of highly conductive all-polymeric fibers[J]. ACS Applied Materials & interfaces, 2015, 7(38): 5-10.
- [15]洪剑寒, 潘志娟, 姚穆. 超高分子量聚乙烯/聚苯胺导电针织物的应变传感性能[J]. 纺织学报, 2016, 37(2): 73-78.
- [16]韩潇, 李文亮, 张建焕, 等. 涤纶导电针织物的制备及应变-电阻传感性能[J]. 印染, 2016, 42(22): 13-17.
- [17]XIAO N T, MINGWEI T, LI J Q, et al. Water-repellent flexible fabric strain sensor based on polyaniline/titanium dioxide-coated knit polyester fabric[J]. Iranian Polymer Journal, 2015, 24(8): 20-26.

- [18]DANDAN H, BI X, ZAISHENG C. Polypyrrole coated knitted fabric for robust wearable sensor and heater[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(11): 40-48.
- [19]王俊璞. 柔性导电纤维/织物应变传感行为与机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [20]邹梨花, 徐珍珍, 杨伟平, 等. 一种碳纳米管聚苯胺涂层针织物应变传感器的制备方法: 中国, 110359 272A[P]. 2019-10-22.
- [21]GUAN M C, MENG YUN Y, ZHENG L X, et al. Flexible and wearable strain sensing fabrics[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 325(1): 20-30.
- [22]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.
- [23]曹宇臣, 郭鸣明. 石墨烯材料及其应用[J]. 石油化工, 2016, 45(10): 1149-1159.
- [24]张莹莹, 沈兰萍, 翟娅茹. 针织结构柔性传感元件的拉伸电学性能[J]. 纺织高校基础科学学报, 2020, 33(4): 39-44.
- [25]刘焘, 邹奉元. 涂碳纤维导电针织物的结构设计及其传感性能[J]. 纺织学报, 2014, 35(9): 31-35.
- [26]王云燕. 智能服装柔性传感器的结构与性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [27]王刚, 沈为, 徐天华. 手功能评估用针织衬纬组织传感器的传感性能探讨[J]. 产业用纺织品, 2018, 36(3): 22-26.

收稿日期 2021年3月15日

信息直通车

欢迎订阅《针织工业》

《针织工业》是国家新闻出版广电总局批准的国内外公开发行的针织专业科技期刊, 创刊于1973年, 由天津市针织技术研究所、中国纺织信息中心联合主办, 由全国针织科技信息中心出版发行。

《针织工业》, 全国中文核心期刊, 曾多次获得部、市级奖励, 现已入编《中国学术期刊网络出版总库》、《CNKI 系列数据库》(已开通优先数字出版)、《中国核心期刊(遴选)数据库》等, 在国内外具有广泛影响。

《针织工业》主要报道针织行业前沿科技成果与加工实践经验, 推广针织、染整及成衣方面的新技术、新工艺, 在学术性、创新性、前瞻性方面, 质量水平极高, 具有深远的学术影响力。同时, 依托广大院校教授、重点企业资深专家等的支持, 每年举办纬编技术、原料创新、针织染整等技术交流会议和高端论坛, 有效助力科技成果的转化与应用, 推动行业技术的传播与进步, 促进针织产业的转型升级, 贴近行业, 服务行业, 具有广泛的行业影响力。

《针织工业》主要栏目为针织技术、针织原料、印染技术、制衣技术、检测与标准、行业新闻等, 其技术性强、信息量大、知名度高、发行覆盖面广。

《针织工业》为月刊, 大16开, 全部进口铜版纸精印, 国内外公开发行。国际标准刊号 ISSN 1000-4033, 国内统一刊号 CN 12-1119/TS, 广告经营许可证号 1201044000113。邮发代号 6-24, 国内定价 15元/期, 全年 12 期, 共计 180 元(含邮费)。读者可在当地邮局订阅, 亦可向编辑部直接订阅。

E-mail: zzygy1973@163.com(编辑部)

zzygygb@163.com(市场部)

zzygxmt@163.com(新媒体部)



《针织工业》微信公众号