

耐洗型足底温度监测智能传感袜的设计 and 开发

孟粉叶^{1,2} 曹颖¹ 郭明华¹ 沈之懿¹ 姚蔚¹

1. 嘉兴职业技术学院 时尚设计学院, 浙江 嘉兴 314036;

2. 东华大学 纺织学院, 上海 201620

摘要: 分析了目前足底温度监测类服饰的研究现状。结合信息技术、纺织技术和健康监测医学知识, 将温度传感器嵌入纤维中制备温度敏感纱, 然后以添纱的方式将该传感纱嵌入常规袜子的底部, 实现对足底温度信号的感知和传输。同时对袜子进行外观设计, 使其更便捷、轻巧, 以制备功能完备、可机洗的足底温度监测智能传感袜。测试结果表明, 该温度监测智能传感袜在经 30 次洗涤后, 仍保持准确、灵敏的温度监测功能, 表现出良好的耐用性, 能够为用户提供长期、稳定的健康监测服务。

关键词: 智能传感袜; 温度监测; 设计; 拉伸回复性

中图分类号: TS 154. 7

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)06-0019-06

Design and development of washable intelligent sensing socks for plantar temperature monitoring

Meng Fenyue^{1,2}, Cao Ying¹, Guo Minghua¹, Shen Zhiyi¹, Yao Wei¹

1. School of Fashion & Art Design, Jiaxing Vocational & Technical College, Jiaxing 314036, Zhejiang, China;

2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: The current research status of plantar temperature monitoring clothing and accessories was analyzed. By integrating information technology, textile technology and medical knowledge in health monitoring, a temperature sensor was embedded into the fibers to create a temperature-sensing yarn. This yarn was then incorporated into conventional socks by adding it to the bottom acupuncture point to realize the perception and transmission of the plantar temperature signal. At the same time, the appearance of the socks was designed to make them more convenient and lightweight, and the intelligent sensing socks with fully functional and machine washable for plantar temperature monitoring were developed. Test results demonstrate that the temperature monitoring intelligent sensing socks still maintain accurate and sensitive temperature monitoring capabilities even after undergoing 30 washing cycles, showing good durability, and can provide long-term and stable health monitoring services for users.

Keywords: intelligent sensing sock; temperature monitoring; design; tensile recovery

基金项目: 浙江省教育厅科研项目资助(Y202248674)

收稿日期: 2024-04-28

作者简介: 孟粉叶, 1983 年生, 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为智能纺织品的设计和研发, karenmfy@163.com

随着人口老龄化的加剧,老年人的健康问题日益受到社会的广泛关注。糖尿病作为一种常见的慢性疾病,其发病率随年龄增加而快速上升。目前,我国糖尿病患者人数已高达1.3亿,位居世界首位^[1],糖尿病的定期检测和复查给我国的医疗资源带来一定的压力。足底布满了与人体器官紧密联系的反射区,是人体信息相对集中的部位。相关研究表明,温度信号是反映糖尿病患者足部健康状况的重要指标,其变化与糖尿病足溃疡的发生有密切联系,足底2.2℃的温差足以说明足溃疡的出现^[2-3]。基于此,准确、实时监测足底温度变化对于获取复杂的健康状况信息,以及进一步建立智能医疗监测和保健系统至关重要^[4]。高度个性化、便携化和可定制化的数字医疗设备将为人们的生活提供极大的便利,同时能够减轻医疗资源的压力,因而具有广阔的市场发展空间。

足底温度监测袜的研发,正是为了适应这一迫切需求。为此,本文设计并制备含柔性温度传感器的袜子,通过嵌入温敏传感器,实时监测人体足底的温度变化,并创建可视化界面实时显示人体足底温度,以期为老年人和糖尿病患者提供简单、有效的日常健康监测手段,为客观评价患者足部健康状况提供数据支持,协助医护人员对患者足溃疡进行预测判断,实现糖尿病疾病的早发现、早治疗。

1 足底监测袜的研究现状

目前,传统的水银和红外温度计已被广泛应用于人体体温检测。然而,它们仍然存在僵硬、反应缓慢、灵敏度不足、受环境温度干扰性大、准确性低,以及对用户有潜在安全风险等问题^[5-6]。随着信息技术、纺织技术和生命监测技术的飞速发展,将传感器与纺织品结合既可以充分发挥纺织品的透气、柔软、成型工艺灵活、可塑性好和多孔等固有特性,又能实现传感器对信号的感应和传输功能,因而柔性电子器件的制备技术引起相关学科领域的广泛关注^[7-8]。近年来,温度传感器在电子皮肤、人工智能和智能机器人等领域开辟了许多潜在的应用。开发柔性温度传感器是对糖尿病患者足部溃疡进行早期预测的有效方法。热敏电阻薄膜开发与制备在柔性温度传感器的研究中占据重要地位,制备柔性电阻

式温度传感器的常用方法包括:(1)镀膜法^[9-11],如在聚酰亚胺纤维衬底上镀金属膜(如铜薄膜、银薄膜、铂膜),使其具备良好的线性度和较高的灵敏度;(2)喷涂处理法^[12-13],如通过喷雾或丝网印刷的方式,制备柔性负温度系数温度传感器;(3)填充导电材料法^[14-16],如填充石墨、炭黑和碳纳米管等材料,制备具备不同电阻温度系数的柔性温敏材料;(4)3D打印法,即采用3D打印技术制备温度传感芯片;(5)参与织物成型法,如以铂纤维为温敏材料,用裸纤维入的方式制备织物温度传感器。上述工艺制备的温敏传感材料,均能够满足温度检测的要求,但其经多次弯折或洗涤后,容易出现裂纹或断裂的现象,造成短路而产生功能失效,耐久性较差。此外,大多数产品未进行洗涤耐久性测试,重复穿着使用情况也未知,因而可持续性有待证实。

2 足底温度监测传感袜的设计思路

当前智能服装在追求功能性与舒适性双重标准方面面临很大的挑战。具体而言,电子元件的固有属性,如硬度、刚性等,往往会给穿戴者带来明显的异物感,甚至可能产生刺痛感。鉴于此,柔性电子技术广泛涉及的柔性传感器、皮肤电子贴片、薄膜电池等领域,正逐渐成为提升智能服装舒适性的研究焦点^[17-18]。

本文足底温度监测传感袜设计采用涤棉混纺纱包覆温敏传感电阻的方法,同时将传感纱嵌入织物内部,并巧妙地将智能监测模块安置于袜口外侧,以降低穿着过程中的异物感,提升穿着舒适性,使其在满足对足底温度进行监测的同时,增强用户的穿着舒适性。

2.1 纱线选择

为提高穿着舒适性,通过混纺或织制工艺将智能材料与普通纱线结合是一种常见的智能纺织品制备方式。棉、涤纶、氨纶、锦纶等是袜子常用的纤维原料。其中,棉纤维回潮率大,吸水和透气性好,涤纶具有良好的强度、耐磨性和弹性,涤棉混纺纱则能够结合2种原料的优点,使制备的产品兼具棉纱的吸湿柔软性和涤纶的高强耐磨性。

本文通过在传统纺织纱线中混入微型电子传感器及引线,制备满足温度监测功能的温敏传感

纱^[19]。该温敏传感纱为包缠结构,以氨纶长丝为芯纱,锦纶和铜丝为外层包缠纱。为提高铜丝的耐磨性和隐蔽性,在包缠纱的外面采用涤棉纱包裹缠绕,最终形成多层纤维交叉缠绕的复合导电温敏传感纱,其结构如图 1 所示。该传感纱能够在不同温度下产生相应的电阻变化,进而将温度信息转化为电信号,供后续足底温度监测数据的采集和处理。

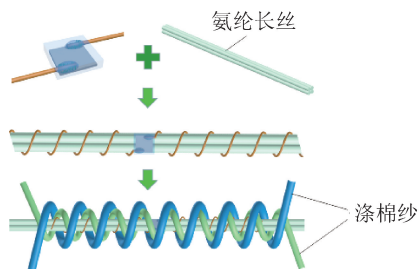
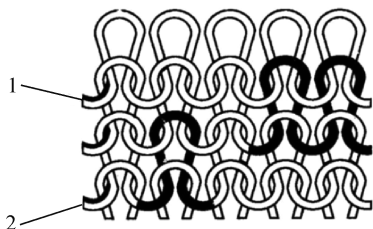


图 1 温敏传感纱的结构示意
Fig. 1 Structure diagram of the temperature-sensing yarn

2.2 织物设计

将温敏传感纱以垫纱的方式巧妙添加并织入织物(图 2)中,实现对温度的实时监测和感应。这一设计满足了传感器与织物的融合与隐蔽的要求,且具有工艺操作简单、可行性好、加工成本低等特点。同时,温敏传感纱传感器的柔性特性也使其能够适应各种复杂的曲面形状,并与足底皮肤良好贴合,有助于提高温度监测的准确性。



1—原组织纱线; 2—垫入的温敏传感纱。
图 2 添纱组织示意
Fig. 2 Structure diagram of yarn adding

2.3 织制

采用 NSSR112 型全自动横编织机(日本岛精贸易集团有限公司)进行袜体的编织,温敏传感纱在袜底成型过程中以垫纱的方式织入袜底并对应于足底穴位的部位(图 3 的蓝色圆点处)^[20]。温敏传感纱的引入使得袜体具备对皮肤温度变化监测的敏感性。与传统的温度传感器相比,这种基于针织结构的足底温度监测传感袜具有更好的柔韧性和适应

性,可以与足底完美贴合,实现温度监测的智能化。

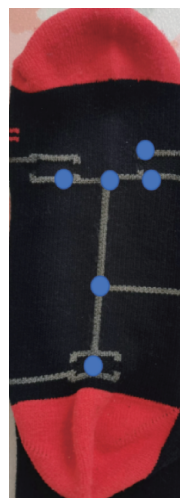


图 3 智能传感袜的温度监测点(蓝色圆点)
Fig. 3 Temperature monitoring points for intelligent sensing sock (blue dots)

2.4 温度监测智能模块集成系统

实现足底温度监测的集成系统主要包括传感模块、通信模块和人机交互模块。

(1)传感模块是实现温度监测的关键,其功能是将监测的电阻信号转换为易于读取和识别的温度信号。本文传感模块选用高灵敏度的温敏传感器并将其包覆于纱线中,再通过嵌入的方式将这种传感纱线织入袜体底部,以捕捉足底温度变化,记录足底温度随时间的变化情况,为后续临床数据分析提供丰富的原始数据。

(2)通信模块负责传输传感器采集到的数据和信息。智能服装与数据终端的通信主要基于蓝牙、无线局域网(Wi-Fi)和近场通信(NFC)等技术。通信模块是整个袜子智能监测系统的桥梁,负责将传感模块采集的温度数据传输到人机交互模块中。本文智能传感袜的设计采用无线通信技术,用户可以自由移动而不受连接信号线的束缚。同时,通信模块还具备高度的稳定性和抗干扰能力,确保数据传输的准确性和实时性。

(3)人机交互模块是整个系统的用户界面,其通过手机应用软件(APP)的形式将足底温度数据以直观的方式展示给用户。用户不仅可以实时查看当前的足底温度,还可以查看历史数据,了解自身足底温度变化趋势。此外,人机交互模块还设定温度阈值,当检测到足底温度异常时,人机交互模块会及

时发出预警信号,提醒用户注意。

传感模块、通信模块和人机交互模块这 3 个模块的协同作用,能够实现对足底温度的实时监测和数据分析,为用户足部健康提供有力保障。

2.5 感温监测实现方式

本文应用生物传感器技术、无线通信技术、云计算与大数据技术,以及智能算法与机器学习等多种技术手段,开发人机交互 APP(图 4)。袜底嵌入的传感纱可感应足底温度,实现智能传感袜实时采集、整合、分析、记录、反馈生理数据的功能,并传输至手机或其他智能设备上,为用户提供实时数据和远程医疗咨询等服务,辅助医护人员进行疾病诊断,提高医疗服务的效率和质量。

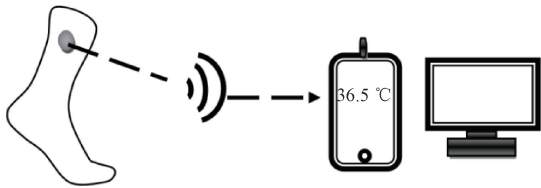


图 4 智能传感袜传感模块的人机交互

Fig. 4 Human-computer interaction sensing module of intelligent sensing sock

3 耐水洗性能评估

3.1 伸长率和回复率

自然伸直状态下,对温度监测智能传感袜袜底的不同位置进行测量并标记。记录袜子的初始长度 L_0 ,然后采用拉伸往复试验机将其拉伸到最大长度 L_1 ,选取 5 块试样,每块试样选取 3 个不同位置进行测试。根据式(1)和式(2)分别计算试样的平均伸长率(k)和回复率(ε)。

$$k = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L'_0}{L_1 - L_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: L_0 ——试样初始长度,mm;

L_1 ——试样拉伸后的长度,mm;

L'_0 ——试样拉伸回复后的长度,mm。

本文温度监测智能传感袜洗涤前后伸长率和回复率的变化如图 5 所示。由图 5 可以看出,与洗涤前相比,洗涤后温度监测智能传感袜的伸长率增大,回复率减小,但回复率仍超过 80%,表明洗涤后温

度监测智能传感袜仍具有良好的拉伸回复性,穿着使用时能够与足部良好贴合,适用于足底皮肤温度的非侵入式监测。

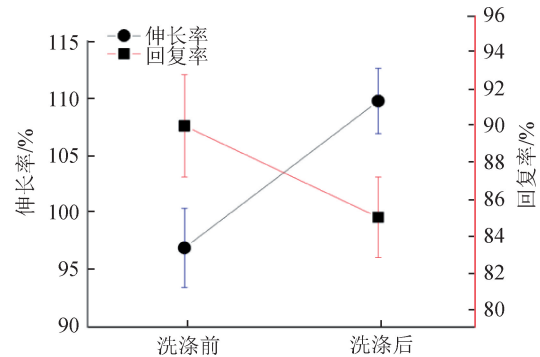


图 5 洗涤前后温度监测智能传感袜伸长率和回复率的变化

Fig. 5 Changes in elongation and recovery rate of temperature monitoring intelligent sensing socks before and after washing

3.2 灵敏度

为定量分析温敏传感纱测温精确度的情况,有必要对袜底温度监测穴位垫入的温敏传感纱的电阻-温度关系进行标定^[21]。本文制备的温敏传感纱的电阻-温度特性曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着测试温度的增加,温敏传感纱的电阻呈下降趋势,温度每变化 1 °C,电阻变化 $(280.51 \pm 8.10) \Omega$ 。

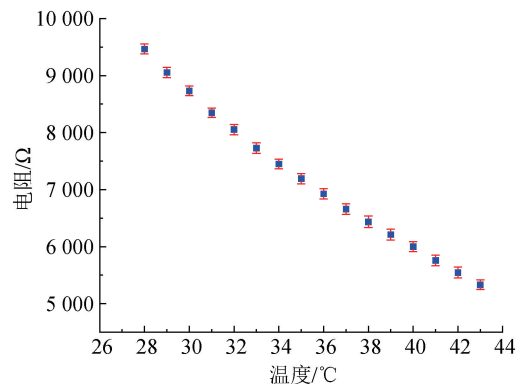


图 6 温敏传感纱的电阻-温度特性曲线

Fig. 6 Resistance-temperature characteristic curve of temperature-sensing yarn

3.3 测温精度

为明确洗涤前后温敏传感纱传感功能的变化情况,本文对洗涤前后温敏传感纱的测温精度进行对比。

温敏传感纱的洗涤选用 Y089D 型全自动缩水

率试验机,参照 ISO 6330:2021《纺织品测试用家庭洗涤和干燥程序》机洗标准,机洗程序为 4 N,干燥方式为自然晾干,共洗涤干燥 30 次^[22]。洗涤前后温敏传感纱测温精确度的变化如图 7 所示。

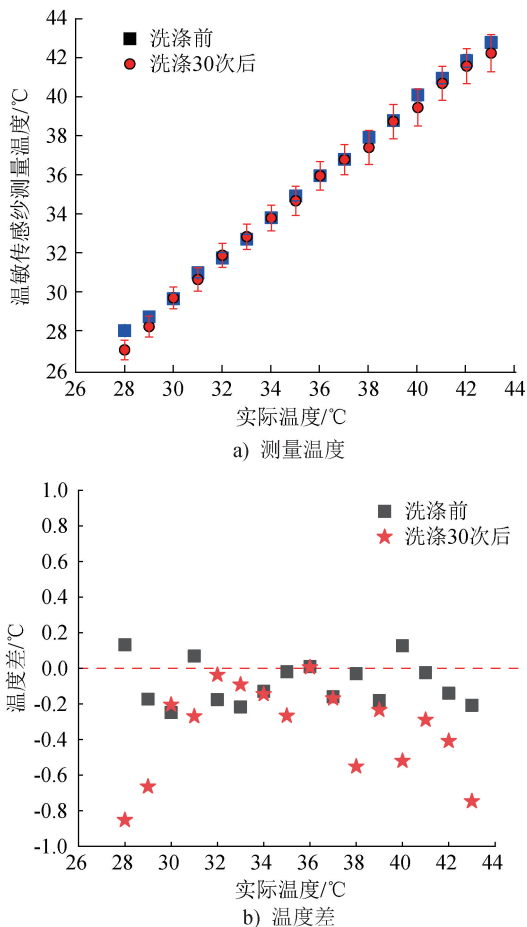


图 7 洗涤前后温敏传感纱的测温变化情况
Fig. 7 Temperature changes of temperature-sensing yarn before and after washing

从图 7a)可以看出,洗涤前后温敏传感纱测量温度与实际温度的最大差值为 0.984 °C (实际温度为 28 °C 时),最小差值为 0.005 °C (实际温度为 36 °C 时)。从图 7b)可以看出,洗涤前后温敏传感纱的测量温度存在一定的差异,洗涤后,测量温度与实际温度之间的差异更明显。洗涤前,3 根温敏传感纱平均测量温度与实际温度之间的最大差值为 -0.25 °C (实际温度为 30 °C 时),洗涤后最大差值为 -0.85 °C (实际温度为 28 °C 时)。经 30 次洗涤后,37 °C 下温敏传感纱的电阻值为 6 504~6 678 Ω (对应的温度为 36.1~37.6 °C)。相较之下,Hardy 等^[23]制备的温度传感电子纱,经 25 次洗涤后,

37 °C 下的电阻值为 6.1~6.7 kΩ (对应的温度为 35.9~38.5 °C)。由此可知,本文制备的温敏传感纱在洗涤后具有更高的测温精度,适用于足底智能监测传感袜的设计与制备,所得智能监测传感袜具有较好的重复洗涤性和穿着可靠性。

4 结论

本文以为老年人及糖尿病患者提供可穿戴的、舒适的足底温度监测袜为目标,设计并制备了一款足底温度智能监测传感袜。首先,通过在传统纺织纱线中混入微型电子传感器及引线制备温敏传感纱,供后续足底温度监测数据的采集和处理。其次,将温敏传感纱以垫纱的方式织入袜底并对应足底穴位,制成可日常穿着的足底温度监测传感袜。阐释了温度监测智能模块集成系统的工作原理和人机交互的实时监测方式。最后,测试并分析了洗涤前后温度智能监测传感袜试样的拉伸回复性、灵敏度与测温精度。试验结果表明,该温度监测智能传感袜经 30 次洗涤后,仍具有良好的拉伸回复性和较高的测试灵敏度,表现出良好的耐用性,能够为用户提供长期、稳定的健康监测服务。研究成果不仅能够为老年人及糖尿病患者的健康监测提供新的解决方案,还能够促进相关领域的技术进步和应用拓展,如康复训练、湿度感应、压力监测等,为智能穿戴提供更多样化的应用选择,为人们的健康和生活带来更多的便利性与可能性。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] FANG Y S, CHEN G R, BICK M, et al. Smart textiles for personalized thermoregulation[J]. Chem Soc Rev, 2021, 50(28): 9357-9374.
- [2] 王云. 监测足部皮肤温度预测糖尿病足溃疡的价值分析[J]. 安徽医药, 2018, 22(11): 2203-2205.
- [3] 张道英, 杨燕玲, 黄浩, 等. 糖尿病足病理机制与治疗方法研究进展[J]. 沈阳药科大学学报, 2021, 38(6): 636-642.

- [4] REYZELMAN A M, KOELEWYN K, MURPHY M, et al. Continuous temperature-monitoring socks for home use in patients with diabetes observational study [J]. J Med Internet Res, 2018, 20(12): e12460.
- [5] HUAN J J, BERNSTEIN J S, DIFUNTORUM P, et al. A wearable skin temperature monitoring system for early detection of infections [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(2):1670-1679.
- [6] HUGHES-RILEY T, JOBLING P, DIAS T, et al. An investigation of temperature-sensing textiles for temperature monitoring during sub-maximal cycling trials [J]. Textile Research Journal, 2021, 91(5/6): 624-645.
- [7] CAI J Y, DU M J, LI Z L. Flexible temperature sensors constructed with fiber materials [J]. Adv Mater Technol, 2022, 7(7): 2101182.
- [8] 邢任权,闫静,杨光,等. 纤维/纱线柔性电阻式应变传感器的研究进展 [J]. 产业用纺织品, 2022, 40(1): 1-7.
- [9] LING K, YA L S, JIAN Z, et al. A flexible resistive temperature detector (RTD) based on in-situ growth of patterned Ag film on polyimide without lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2019, 216: 111052.
- [10] RUI Y, SHUAI Y Y, QIAN M L, et al. Flexible conducting Ag nanowire/cellulose nanofibril hybrid nanopaper for strain and temperature sensing applications [J]. Science Bulletin, 2020, 65(11): 899-908.
- [11] SHAO L, ZHAO X H, GU S P, et al. Pt thin-film resistance temperature detector on flexible Hastelloy tapes [J]. Vacuum, 2021, 184(11): 109966.
- [12] LIU Q X, TAI H L, YUAN Z, et al. A high-performances flexible temperature sensor composed of polyethyleneimine/reduced graphene oxide bilayer for real-time monitoring [J]. Advanced Materials Technologies, 2019,4(3):1800594.
- [13] XIAO Y, JIANG S W, LI Y R, et al. Screen-printed flexible negative temperature coefficient temperature sensor based on polyvinyl chloride/carbon black composites [J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(2): 25-35.
- [14] 曾晓. 基于 PVDF/PEO 柔性温度传感器研究及其应用 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
- [15] 吴林辉,叶双莉. PDMS 基柔性温度传感器的温敏性能研究 [J]. 现代化工, 2019, 39(5): 76-80.
- [16] CAO Z R, YANG Y N, ZHENG Y H, et al. Highly flexible and sensitive temperature sensors based on $Ti_3C_2T_x$ (MXene) for electronic skin [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7:25314-25323.
- [17] 汪婉婉,赵蒙蒙. 传感器件在智能监测服装中的应用 [J]. 产业用纺织品, 2024, 42(1): 8-14.
- [18] 李浩宇,王海楼,魏发云,等. 柔性可穿戴湿度传感器的研究进展 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(9): 1-12.
- [19] 王浣雨,孟粉叶,胡吉永,等. 智能纺织品用温度传感纱研究进展 [J]. 丝绸, 2022, 59(12): 54-63.
- [20] EIZENTALS P, KATASHEV A, OKS A, et al. DAid pressure socks system: performance evaluation [J]. Gait & Posture, 2021, 84: 368-376.
- [21] GONZÁLEZ J T, OVEJERO R G, IZQUIERDO L R, et al. Smart sock and resistivity measurement in textile materials [C] // New Trends in Disruptive Technologies, Tech Ethics and Artificial Intelligence: The DITTE Collection 1. Salamanca, Spain: Springer International Publishing, 2022.
- [22] 邹颖,孟粉叶,王浣雨,等. 电子纺织品洗涤老化研究进展:洗涤因素及失效模式 [J]. 丝绸, 2023, 60(7): 74-83.
- [23] HARDY D A, RAHEMTULLA Z, SHAHIDI A. Wash testing of electronic yarn [J]. Materials, 2020, 13(5): 1228.

热烈祝贺《产业用纺织品》获
第五届上海市高校科技期刊案例库
特色科技期刊