



生物医学工程跨学科综合实验教学实践

常向荣¹, 周杰^{1*}, 邓维礼²

(1. 西南交通大学医学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学材料科学与工程学院, 成都 610031)

摘要: 结合生物医学工程专业多学科交叉特点, 探讨了通过综合实验教学设计进行融会贯通教学。在实验组织上采用“项目式”实验, 在实验内容上实现多元化综合设计。以“导电水凝胶材料在柔性电子及人体中的应用”为主题, 设计了导电水凝胶制备、材料性能表征、柔性电极体表电信号检测及基于 Python 生理信号分析系列综合实验, 构建了“医用材料+”实践教学。实验安排跳出章节内容实验设定的局限性, 体现了生物医学工程学科的融合交叉, 有效拓展了专业教学的深度和广度。

关键词: 生物医学工程; 综合实验教学; 导电水凝胶材料; 信号处理

中图分类号: G642, TQ427

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230465

Interdisciplinary Comprehensive Experimental Teaching Practice in Biomedical Engineering

CHANG Xiangrong¹, ZHOU Jie^{1*}, DENG Weili²

(1. College of Medicine, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the multidisciplinary nature of biomedical engineering, a comprehensive experimental teaching design is investigated. Using a project-based learning approach, a variety of experiments are conducted. A comprehensive experiment design is introduced on the topic of “The application of conductive hydrogel materials in flexible electronics and the human body”, including the preparation of conductive hydrogel, the evaluation of material performance, the detection of electrical signals on flexible electrode surfaces, and physiological signals analysis using Python. Furthermore, a “medical materials+” teaching system is developed, which integrates expertise in electronics, computer information processing, and materials science. The experimental arrangement breaks through the limitations of chapter experiments and effectively increases the depth and breadth of professional instruction by reflecting the intersection and integration of biomedical engineering disciplines.

Key words: biomedical engineering; comprehensive experimental teaching; conductive hydrogel materials; signal analysis

生物医学工程(biomedical engineering, BME)是一门集材料、物理、化学、数学、电子信息与计算机技术等多学科知识的交叉学科, 为医学领域中的各种问题提供有效的解决方案^[1]。在本科教学过程中, 如何有效平衡教学的广度和深度, 以确保 BME 专业的学生能够全面掌握知识体系和实践技能, 是一项具有挑战性的任务。BME 学科具有交叉性特点, 这为该学科的实验教学带来了机

遇也带来了挑战。因此, 针对 BME 专业学生的培养, 需要采取一系列措施来确保他们能够获得广博的知识基础和较强的专业技能, 包括优化课程设置、强化实践教学、鼓励学生参与科研项目等。

本文从交叉融合实验教学设计出发, 探讨了利用柔性电子中导电水凝胶电极的制备与表征构建生物医学信号检测综合实验项目, 培养生物医学工程专业学生的综合素养。在实验模式上采取

收稿日期: 2023-10-04; 修回日期: 2024-01-26

基金项目: 四川省自然科学基金(2023NSFSC0313); 2022 年西南交通大学一流本科课程建设专项(2022098); 西南交通大学 2024 年校级本科教育教学研究与改革项目(20240213, 20240324)。

作者简介: 常向荣(1979-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事生物医学工程方面的研究。

*通信作者: 周杰(1981-), 男, 博士, 工程师, 主要从事生物医学工程及医疗器械的教学和研究。E-mail:

zhoujie@swjtu.edu.cn

“项目式”实验,选择BME领域的一个主题系统安排实验内容。在实验内容设置上,注重多元化综合,涵盖生物医用材料、生物医学传感器、生物医学信号处理等方向,充分体现生物医学工程的跨学科特性。

生物医用材料教学涉及材料的特性、制备、应用等方面。通过生物材料实验操作,让学生了解不同生物材料的生物相容性、力学性能、降解性能、电磁特性等方面知识。通过实验数据对材料性能进行评估和优化,并深入探讨该领域的一些前沿问题。

生物医学传感器检测研究的基础是创新性功能材料的制备。学生需要了解传感器的基本原理和方法,如电化学传感器和光学传感器的原理和应用。生理信号的检测也是课程的重要组成部分,包括心电和肌电的测量等。通过实验培养学生在生物医学检测方面的实际能力。

生物医学信号处理主要涉及生物医学信号的采集、处理和分析等方面。学生需要了解信号处理的基本原理和方法,如滤波、傅里叶变换、信号特征提取等,熟悉相关的信号处理工具和软件的应用,如MATLAB、Python等,并通过实验操作掌握相关技能和方法。

1 实验设计背景与框架

导电水凝胶^[2]是一种由聚合物网络和大量水组成的具有三维网络结构的新型材料,基于其优良的稳定性和血液相容性,被广泛应用于柔性电极、植入式传感电极、体内植入修复材料、电刺激药物释放系统等方面^[3-4]。在人体电测量方面, Jiheong Kang 团队报告了一种模板导向的组装方法制备导电水凝胶,使其能够在一个高度可伸缩、水合的网络环境中,记录体内超低电压神经调节和高质量的心外膜心电图(electrocardiogram, ECG)信号^[5]。David J. Mooney 团队研制出一种超软、高度多孔的导电水凝胶电极,由加载有导电碳纳米材料的超软粘弹性水凝胶基质组成,与器官组织表面具有非常好的贴合性,如与心脏或大脑皮层的卷曲表面紧密贴合以接收和传递电脉冲信号,使其对脆弱器官的损伤风险降到最低^[6]。

本文构建的“导电水凝胶在柔性电子及人体中的应用”实验项目,对内容进行提炼与可视化,将文献资料和实验资源进行梳理,建立该实验的知识图谱^[7],如图1所示。该知识图谱方便学生查阅实验要求和实验资料,及时了解自己对知识点的掌握情况。

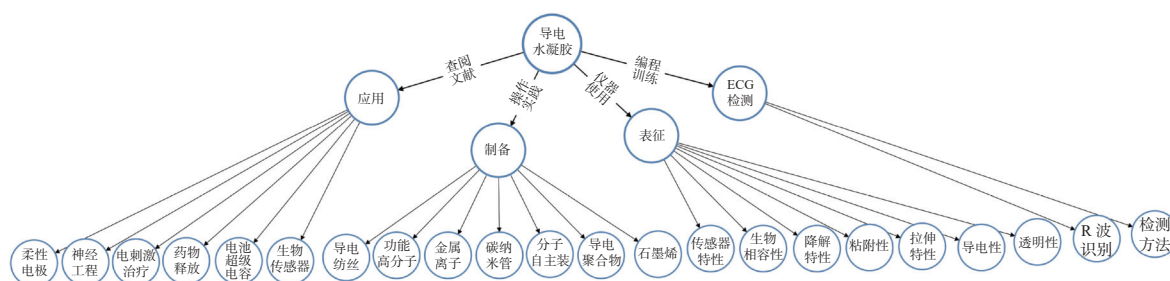


图1 综合交叉实验知识图谱

“导电水凝胶在柔性电子及人体中的应用”实验可以安排在生物医用材料实验课程和生物医用传感器实验课程中。实验共计5次课,包含导电水凝胶制备、材料表征、应用与信号分析等,完整的实验框架如图2所示。

为满足“两性一度”金课标准,实验教学从“课堂实验教学”向“开放实验教学”转变,即从学生实验时间、实验操作空间、实验内容3个方面进行开放实验设计^[8]。在内容设计上满足3个

层次学生设定^[9],即基础实验C层、提高型实验B层、研究创新型实验A层。C层为基本实验,是教师给定实验原理和操作流程;B层是初级的自主学习,学生能够重复参考文献给出的实验原理和步骤,完成导电水凝胶制备;A层是创新层次,学生需通过大量文献的阅读与论证,对现有的导电凝胶制备提出自己的实验方法与步骤。实验通过引导学生查阅前沿文献^[10],掌握水凝胶在柔性电极上的应用及制备和表征方法。

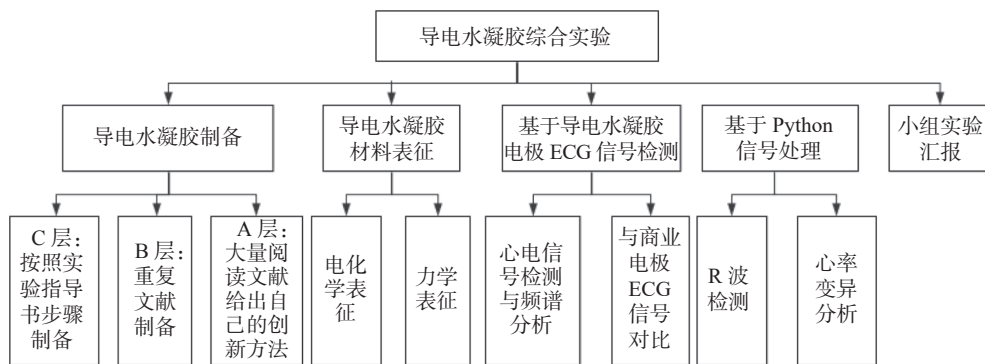


图 2 导电水凝胶综合交叉实验框架图

2 实验实施

2.1 仪器与试剂

1) 仪器。电子天平(BSA1245); 磁力搅拌器(84-1A); 超声波清洗器(FRQ-10); 电热干燥箱(DHG-9053A); 电化学工作站(Interface1010E); 紫外分光光度计(TU-1901); 万能力学试验机(Instron-5567); 多道生理信号采集仪(BL420)。

2) 试剂。氯化钠(NaCl)、聚乙二醇二缩水甘油醚(PEGDE)、明胶(Gel)。

2.2 水凝胶的制备

由于本科生在知识掌握上存在一定的层次差异, 实行分层实验教学, 最基本要求是按照实验指导书完成导电水凝胶制备^[1]。基础实验 Gel-NaCl 凝胶制备步骤如下: 60 °C 水浴条件下将 3.2 g 明胶溶于 10 mL 去离子水中; 保持该条件, 向明胶溶液中加入不同量(0.3、0.6、0.9、1.2 mL)的 PEGDE 直至搅拌均匀; 称取不同量的(0.5、1.0、1.5 g)NaCl, 向溶液中加入 NaCl 并继续搅拌, 待溶液充分混合后利用超声清除凝胶中气泡; 将混合后的溶液转移到模具中, 在 60 °C 的烘箱中静置 24 h 成型, 得到不同配比的 Gel-NaCl 水凝胶。

2.3 导电凝胶材料学表征

2.3.1 电化学性质表征

打开电化学工作站, 调至计时电位法测试模式, 设置电压上下阈值分别为 ± 2 V, 阴阳两极通电时间均设置为 20 s, 分别在 0.001、0.002、0.005、0.008、0.010、0.012 A 的恒定电流下测试对应的稳定电压, 得到水凝胶的 U/I 曲线, 选择曲线中斜率较稳定的阶段进行线性拟合, 得到直

线的斜率即为水凝胶的电阻, 记为 R , 单位 Ω 。再测量水凝胶的几何特征, 计算水凝胶的电导率 σ , 单位 mS/cm 。

2.3.2 力学性能表征

本实验利用万能力学试验机进行导电复合水凝胶的压缩性能以表征水凝胶的力学性能测试。选用 24 孔细胞培养板为成型模具制备 Gel、Gel-NaCl 水凝胶样品, 得到底面积为 2 cm^2 的圆柱状水凝胶样品, 测量水凝胶样品的高度 h , 将样品放置在万能试验机两模具之间, 设置压缩速率为 5 mm/min , 将试样压缩至样品初始高度的 80% 时停止实验, 对每一组样品进行 4 次重复测试。导出压缩传感器记录的位移-应力($x-F$)数据集合, 利用 OriginProLab 软件将数据转化为应变-压缩强度, 并绘制水凝胶的压缩率-压强曲线。

2.4 导电凝胶电极心电信号检测

将制备好的导电水凝胶制作成 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 方形电极用于心电信号检测。为验证本实验制备的导电水凝胶电极性能, 与商用电极相对照, 进行标准 I 导联心电信号检测, 利用多道生理信号采集仪同时采集两种不同电极片下的心电信号, 并对两种电极采集到的信号从时间域和频率进行对照, 分析两个电极测量信号的一致性。

2.5 基于 Python 心电信号 R 波识别

将多道生理信号采集到的 I 导联心电信号数据导出为文本文件, 利用 Python 编程进行心电信号 R 波检测。心电识别算法通常包括以下 3 个步骤。

1) 预处理。将原始心电图信号进行滤波去噪、去基线漂移等预处理。

2) 特征提取。这一步涉及使用阈值法、滑动

窗口法、差分法等具体技术来从心电图信号中提取有意义的信息。

3) 心电信号识别。主要依赖于各种算法, 如支持向量机 (support vector machine, SVM)、主成分分析 (principal component analysis, PCA) 和小波分析 (wavelet analysis, WA) 等进行分类和识别^[12-13]。

3 实验结果与分析

3.1 导电水凝胶材料

导电水凝胶具有高柔性、高渗透性及高导电性能。生成导电透明的水凝胶制备成品如图3所示。本实验利用紫外分光光度计测量水凝胶透光度, 紫外分光光度计的波长选用400~800 nm, 初始化后将凝胶置于样品槽中, 测量后, 得到透光度如图4所示。



图3 水凝胶制备成品图

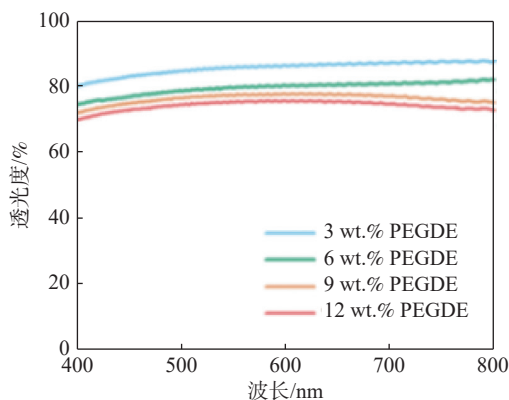


图4 PEGDE 对水凝胶透光度的影响

3.2 电化学测试

测试 Gel-NaCl 导电水凝胶的电化学性能, 将水凝胶接入电路中, 在外加电源的作用下, 小灯泡可发光, 证明该水凝胶具有良好的导电性, 如图5所示。

Gel-NaCl 水凝胶的电导率如图6所示, 从图中可以看出 Gel-NaCl 水凝胶的电导率在一定范围内(0~1.5 g NaCl)随着 NaCl 的加入, 由 5 mS/cm 变为 17 mS/cm, 水凝胶的电导率提升约为原先的3倍, 这表明 NaCl 为水凝胶中的主要导电组分, 对水凝胶的导电起到最直接的影响。



图5 导电水凝胶导电特性

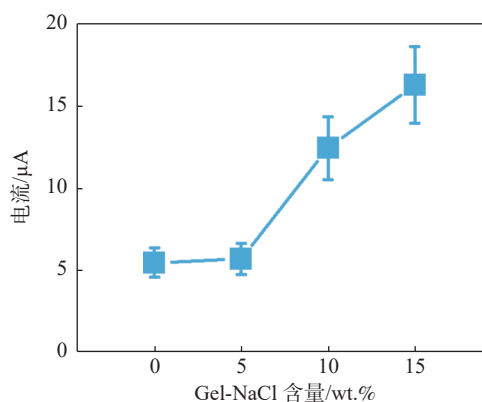


图6 导电水凝胶电阻抗特性

3.3 力学性能表征

本实验采用不同 PEGDE 含量水凝胶测量其力学性能。制备水凝胶在不同 PEGDE 含量下, 水凝胶表现出不同的力学性能^[14]。图7(a)所示为 PEGDE 含量分别为 0 wt.%、3 wt.%、6 wt.%、9 wt.%、12 wt.% 的水凝胶的压缩性能; 如图7(b)所示为 80% 应变下不同 PEGDE 含量对应的压缩强度。水凝胶的压缩模量受 PEGDE 浓度的影响, 随着 PEGDE 含量的增多, 水凝胶的压缩模量也随之上升, 当 PEGDE 含量为 12 wt.% 时, 压缩模量最大, 最大值可达 4 MPa。含量增加后, 水凝胶粘性降低, 作为体表电极, 本文选用 9 wt.% PEGDE, 以保证作为体表电极的力学性能和粘性。

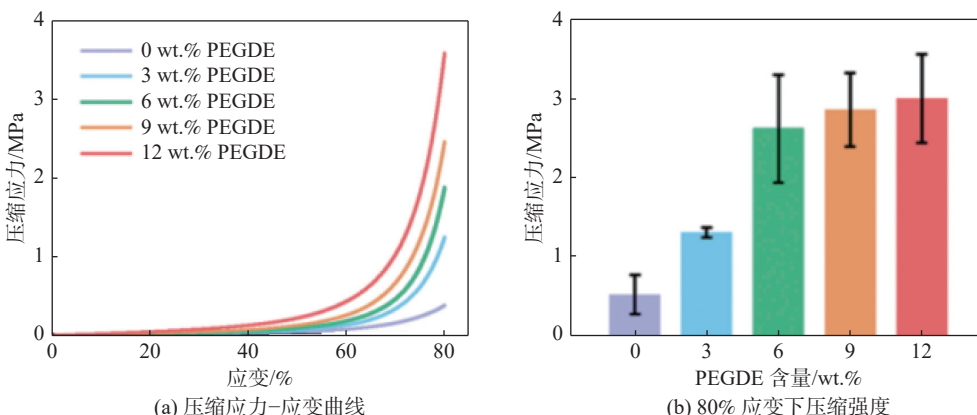


图 7 PEGDE 对 GE 水凝胶压缩性能的影响

3.4 基于导电水凝胶电极心电信号检测

利用多道生理信号采集仪同时采集人体 I 导联心电图，电极位置如图 8 所示。调整相同的采集参数，测量结果如图 9 所示，第一通道为商用一次性电极测量结果，第二通道为导电水凝胶电极测量结果。根据心电信号测量结果，可见导电水凝胶电极与商用电极在保持细节方面表现出同等的优秀性能。

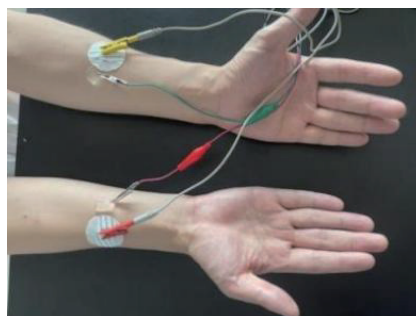


图 8 导电水凝胶与商业电极同时进行心电图测量图

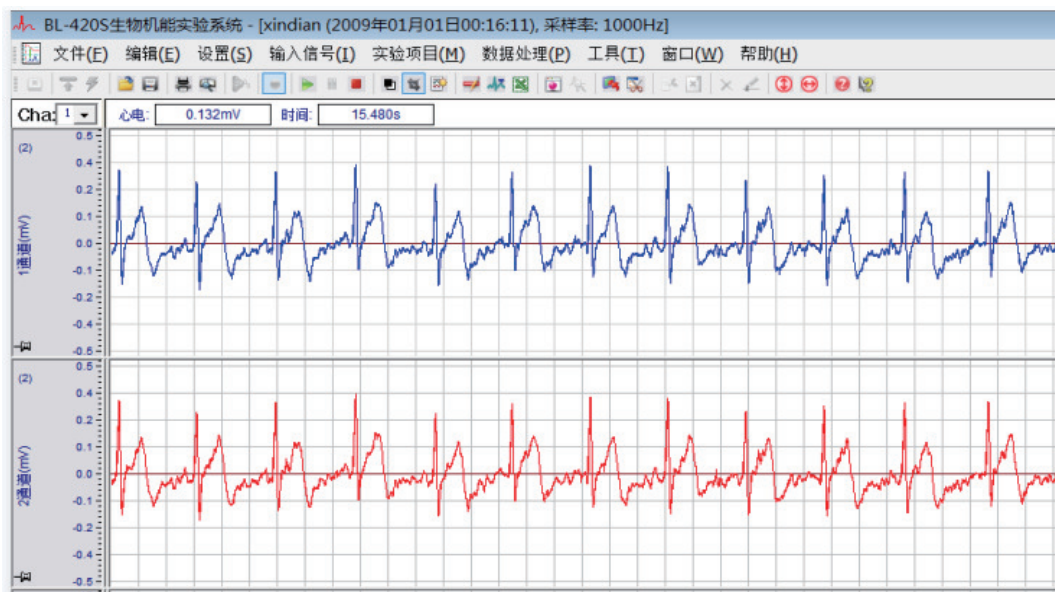


图 9 两种电极同时进行心电信号采集结果对照图

3.5 频谱分析与 R 波识别结果

让学生学会使用 Python 进行编程，掌握计算机数据处理语言和信号处理与分析算法，在处理过程中用到 Python 的库、数据处理的库 (NumPy、SciPy、Pandas 等)、用于数据可视化的库 (Matplotlib、Seaborn 等)、生物医学信号处理的库 (Biosppy、Heartpy、PyEEG、Hrvanalysis、Neuro-

Kit2 等)。对两种不同电极测量心电信号进行频谱运算识别结果如图 10 所示。

对前期采集的 ECG 数据进行信号处理实验，可以对心电信号进行去噪滤波、特征波检测识别、信号分析等计算机处理^[15]。如图 11 所示，实验要求利用 Python 编程对心电信号 R 波进行识别。

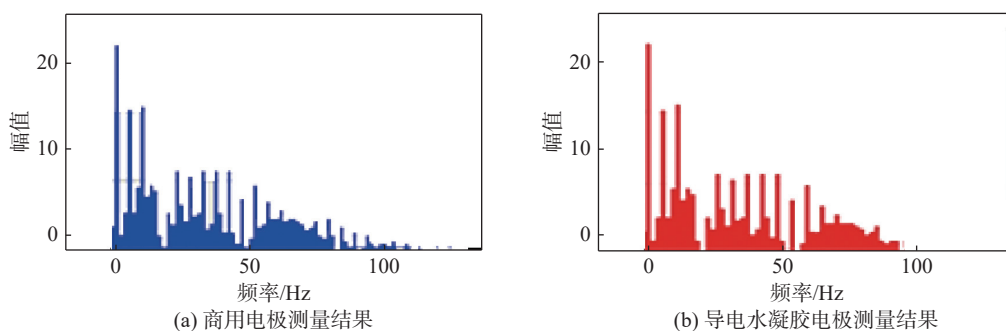


图 10 两种电极采集心电信号频谱分析对照图

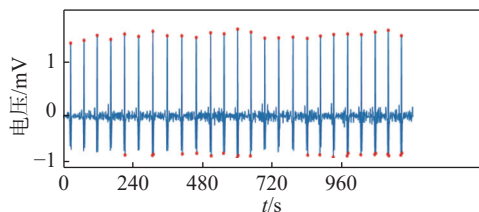


图 11 基于 Python 心电信号 R 波识别实验结果

4 实验教学评价

实验技能的培养,除学习基本实验操作技能外,还要进行实验设计、数据分析、实验结果应用探讨等训练,这也是对学生实验素养培养的重点。通过材料合成和表征让学生掌握了柔性电极材料的制备,从实验结果中对信息提取与分析也是生物医学工程专业学生应具备的基本能力和科学素养。Python 编程更适用于非计算机软件专业学生,学生通过自主学习掌握 Python 语言,完成生物医学信号分析。近两年内选修本实验课程的 91 位同学参与问卷调查的结果如表 1 所示。

表 1 教学效果问卷调查结果统计

问卷调查项目	非常同意 占比/%	平均 得分	标准差	最小值
文献查阅与阅读能力 得到锻炼	81.32	4.77	0.52	3
实验操作能力 得到锻炼	80.22	4.73	0.61	2
编程能力 得到锻炼	74.73	4.63	0.72	2
做PPT和汇报能力 得到锻炼	76.92	4.70	0.58	3
对科学研究模式 有一定的认知	76.92	4.77	0.42	4

在调查中,每个项目都采用了五分量表,这 91 位学生根据自身实际情况分别对各项目进行了打分。具体的分值设定如下:5 分表示“非常同意”,4 分表示“同意”,3 分表示“中立或不确定”,2 分表示“不同意”,1 分表示“非常不同

意”。通过对每个项目得分结果的描述性统计可以看出,学生学习能力得到了较为显著的锻炼与提升。

通过实验课程锻炼,课后学生进一步深挖课程中积累的兴趣点,参加“生命之星”“挑战杯”等全国大学生课外学术科技作品竞赛,并取得了优异的成绩。

5 结束语

本文探讨了生物医学工程专业综合实验开设的教学实践,将项目式实验思路引入本科教学实验中,进行创新性实验设计。通过引导学生探索不同的导电水凝胶制备方法,并结合材料学标准训练,使学生掌握现代分析仪器检测方法,提高学生对样品表征的分析能力。探究导电水凝胶的电极医学应用,进而锻炼学生的数据分析和处理能力。通过开设基于项目式的综合实验,强化学生对学科的整体思维和科研的全局观,在生物医用材料研究方面达到触类旁通,有利于激发学生的科研兴趣,培养勇于创新、实践能力强、理工医结合的复合型人才,形成教学与科研相互促进的良好局面。

参考文献

- [1] 于海龙,秦方雨,郑中豪,等.生物医学工程专业本科生实践能力培养探讨[J].生物医学工程进展,2023,44(3):319-324.
- [2] 郑紫荣,王欢.导电水凝胶材料的制备及其应用研究进展[J].现代化工,2023,43(9):66-70.
- [3] HAN L, YAN L W, WANG M H, et al. Transparent, adhesive, and conductive hydrogel for soft bioelectronics based on light-transmitting polydopamine-doped polypyrrole nanofibrils[J]. *Chemistry of Materials*, 2018, 30(16): 5561-5572.
- [4] PENG Q Y, CHEN J S, WANG T, et al. Recent

- advances in designing conductive hydrogels for flexible electronics[J]. *InfoMat*, 2020, 2(5): 843–865.
- [5] CHONG J, SUNG C, NAM K S, et al. Highly conductive tissue-like hydrogel interface through template-directed assembly[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2206.
- [6] TRINGIDES C M, VACHICOURAS N, DE LÁZARO I, et al. Viscoelastic surface electrode arrays to interface with viscoelastic tissues[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(9): 1019–1029.
- [7] 施江勇, 唐晋韬, 王勇军, 等. 基于知识图谱的新兴领域课程教学资源建设[J]. *高等工程教育研究*, 2022, (3): 15–20.
- [8] 伍明, 胡晶晶. 提升学生核心素养的化学开放实验教学模式研究[J]. *实验科学与技术*, 2021, 19(2): 111–115.
- [9] 朱昌平, 黄波, 朱陈松, 等. 通过“三层次实验”培养学生实践创新能力[J]. *实验室研究与探索*, 2007, 26(7): 5–8.
- [10] 张伟, 祁俊侠, 杨茜璐, 等. 基于文献阅读和科研设计培养医学本科生的科研素养[J]. *基础医学教育*, 2023, 25(3): 261–265.
- [11] 孙相彬. 基于明胶的导电水凝胶的制备与性能研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- [12] JEGAN R, ANUSUYA K V, GEORGE E M. Real-time ECG peak detection for heart rate measurement using wavelet packet transform[J]. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, 2015, 19(3): 244–254.
- [13] 牛传莉. 心电信号预处理和波形检测算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [14] 邹健, 陈卓, 王盛冀, 等. 导电水凝胶中交联剂含量对综合性能的影响[J]. *包装学报*, 2022, 14(6): 80–89.
- [15] 李琬, 陈丽娜, 何月涵, 等. 基于创新型人才培养的 Python 语言程序设计教学方法探讨: 以生物医学工程专业为例[J]. *大学教育*, 2023, 12(4): 146–148.

编辑 葛晋

(上接第 18 页)

- [3] 王新, 徐捷, 穆宝忠. X 射线康普顿散射成像实验装置研发[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(2): 86–90.
- [4] 侯玉欣, 陈明, 杨春雷. X 射线探测器的研究现状与展望[J]. *物理*, 2021, 50(8): 526–533.
- [5] 胡刚舰, 陈琦, 魏薇, 等. 基于材料调控的直接转换型铅卤钙钛矿 X 射线探测器研究进展[J]. *发光学报*, 2023, 44(5): 771–785.
- [6] 查钢强, 王涛, 徐亚东, 等. 新型 CZT 半导体 X 射线和 g 射线探测器研制与应用展望[J]. *物理*, 2013, 42(12): 862–869.
- [7] 武蕊, 范东海, 康阳, 等. 半导体辐射探测材料与器件研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2021, 50(10): 1813–1829.
- [8] 李新越, 刘春秘, 于涵, 等. X 射线平板探测器图像噪声分布数学模型构建[J]. *核电子学与探测技术*, 2022, 42(6): 1095–1100.
- [9] 欧阳群. 像素探测器和硅探测器[J]. *科学观察*, 2022, 17(4): 5–8.
- [10] 魏薇. 探索粒子物理世界的高速相机: 像素探测器[J]. *现代物理知识*, 2012, 24(4): 9–18.
- [11] 李贞杰, 张杰, 李木槿, 等. X 射线像素探测器研究进展[J]. *科学通报*, 2022, 67(32): 3809–3822.
- [12] 王萌. 单片式有源像素探测器简介[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2011, 46(10): 75–80.
- [13] 殷中宝, 王亚平, 周代翠. ALICE 新内寻迹系统: 硅像素探测器[J]. *现代物理知识*, 2021, 33(4): 3–8.
- [14] 张彪, 张李昂, 邓文静, 等. ALICE 实验内径迹系统探测器升级[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(3): 734–741.
- [15] 杨生辉, 董明义, 渠超越, 等. 基于单片有源像素传感器的探测模块测试研究[J]. *物理学报*, 2021, 70(17): 89–97.
- [16] 杨晨飞. 基于有源硅像素探测器的高能粒子束流望远镜研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [17] 宋娟. 基于脉冲星导航的 MCP 空间 X 射线探测器关键技术的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.

编辑 葛晋