

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2025.06.022

基于 Miller 金字塔模型的生物医学工程专业实习带教体系构建

林振盛¹, 王天林²

[1. 湖南省人民医院 (湖南师范大学附属第一医院) 医学工程中心, 湖南长沙 410005;

2. 中国医科大学智能医学学院, 辽宁沈阳 110122]

【摘要】 随着医院现代建设的发展, 医疗设备数量急剧增加, 技术复杂性显著提高, 对生物医学工程应用型人才的需求越来越大。鉴于实践教学是应用型人才培养的重要环节, 国内许多高校开始重视校外实习基地建设。目前, 有不少医疗机构承担了高校生物医学工程专业的实习教学任务。然而, 针对生物医学工程专业在医院的实习带教体系仍然缺乏, 科学系统的实习培养模式仍有待探索。基于此, 该文参考 Miller 金字塔模型提出了一种以工程实践能力培养为主线的递进式的带教体系。这种科学的实习教学方法显著提高了实习生在医院医学工程部门的实习质量, 有望为社会培养出更多理论素养高、实践能力强的生物医学工程应用型人才。

【关键词】 生物医学工程; Miller 金字塔模型; 实习教学

【中图分类号】 R318, G642

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2025) 06-0986-07

Construction of an Internship Teaching System for Biomedical Engineering Based on Miller's Pyramid Model

LIN Zhensheng¹, WANG Tianlin²

[1. Medical Engineering Center, Hunan Provincial People's Hospital (The First Affiliated Hospital of Hunan Normal University), Changsha, Hunan 410005, China; 2. School of Intelligent Medicine, China Medical University, Shenyang, Liaoning 110122, China]

【Abstract】 With the advancement of modern hospital infrastructure, there has been a significant increase in both the quantity and technical sophistication of medical equipment. Consequently, the demand for applied biomedical engineering (BME) talent is on the rise. Practical teaching plays a crucial role in cultivating such specialized engineering talent. As a result, numerous Chinese universities have begun to emphasize the establishment of off-campus practice bases. Currently, many medical institutions undertake internship teaching responsibilities for BME students from universities. However, hospitals still lack a structured internship teaching system specifically designed for BME majors, necessitating the exploration of a scientific and systematic internship training model. In response to this need, this paper proposes a progressive teaching framework based on the cultivation of engineering practical skills, drawing inspiration

收稿日期: 2025-03-26。

基金项目: 辽宁省科学技术厅支持中国医科大学高质量发展科技资金项目 (2023020845-JH2/202)。

作者简介: 林振盛 (1993—), 男, 福建省泉州市人, 硕士研究生, 从事医疗设备质量控制及维护管理研究, 邮箱: zslin823@163.com。

通信作者: 王天林, 男, 副教授, 硕士生导师, 从事医疗器械的创新性研究及临床转化, 邮箱: tlwang@cmu.edu.cn。

from Miller's Pyramid Model. This scientifically practice-oriented teaching method has substantially enhanced the quality of intern's practical training in the medical engineering department of the hospital. It is anticipated that this method will cultivate more high-caliber BME professionals with robust practical abilities for society.

【Key words】Biomedical Engineering (BME); Miller's Pyramid Model; Internship Teaching

0 引言

生物医学工程 (Biomedical Engineering, BME) 学科一直以来都被认为是医疗器械产业发展的重要基础和推动力量, 学科持续蓬勃发展使医疗器械产业在国家经济发展中占据了重要地位, 对 BME 人才的需求也逐渐增大^[1-2]。尽管医疗器械产业对 BME 专业毕业生的需求强烈, 但是用人单位普遍反映该专业本科毕业生的工程实践能力及综合素质与岗位要求之间仍存在较大差距^[3]。BME 作为一门跨学科的综合专业性, 涉及的课程门类众多, 学生需要掌握大量医学及工程等多方面的理论知识, 导致参与实习实践的时间和机会严重不足^[4]。另外, 国内大部分高校的工程教育仍然以理论知识的传授为主, 偏重课堂教学, 这种重理论轻实践的教学体系进一步造成毕业生实践能力和分析解决问题能力的不足, 难以满足行业对于应用型工程技术人才的需求^[5]。而应用型人才的培养离不开实践, 工程理论知识必须借助实践才能内化为工程实践能力^[6]。校外实习对于 BME 专业学生而言, 是理论和实践相结合的重要阶段, 是培养实践能力的关键环节。通过实习中的实践活动, 可以锻炼学生分析问题和解决问题的能力, 提高其实践技能和综合素质。

为应对医疗卫生机构现代化发展对临床工程师的需求, 许多高校都将培养临床工程方向的应用型人才作为 BME 本科教育的目标定位, 毕业生一般从事医疗器械的研发、操作、维护及管理等工作。由于医院具有丰富多样的医疗器械, 高校普遍倾向于与其合作共建校外实习基地^[7]。在医院这个资源丰富的工程实践平台中, BME 专业学生可以学习到各种医疗器械的基本原理、结构组成及操作方法, 掌握医疗器械的故障分析方法和维护维修技能, 提高自身综合运用所学知识解决实际工程问题的能力。然而, 关于 BME 专业在医院的实习带教体系

却鲜有报道。因此, 本文基于 Miller 金字塔模型构建了一套科学的实习带教体系, 显著提高了 BME 专业学生在医院医学工程部门的实习质量。

1 BME 学科内涵及产业发展对人才的需求

BME 是由医学、工程学和生物学等多学科高度交叉、深度融合而成的新兴综合性学科, 其涵盖的学科领域和知识范围极为广泛^[8-10]。它以医学需求为导向, 运用自然科学及工程技术的理论和方法对医疗健康领域中存在的问题进行研究和解决, 展现出了广阔的发展前景^[11-14]。早在 20 世纪 50 年代, 美国就已经将 BME 视为一门独立的学科并制定了研究计划。我国 BME 教育起步于 20 世纪 70 年代末, 经过 50 多年的发展, 已形成相对完善的学科教育体系, 极大地推动了国内生物医学工程产业的发展^[15]。

自诞生以来, BME 学科始终发展迅猛, 其研究成果使现代医学发生了革命性变革, 对医学实践产生了重大影响^[16]。BME 学科的不断进步持续推动着医疗器械产业的快速发展。当前, 医疗器械产业已逐渐成为国家经济建设的重要支撑和医疗卫生事业发展的推动力量。越来越多的先进医疗设备被开发并应用于各种疾病的预防、诊断、治疗和康复中, 显著提高了医疗保健的服务质量及人们的健康水平^[17-19]。各级医疗卫生机构中数量庞大的医疗设备的操作、维护和管理急需大量 BME 应用型人才。在发达国家, 每 4 名临床医生就配备了 1 名 BME 专业技术人员。除了医疗卫生机构, 医疗器械生产企业、医疗器械监督管理部门及相关研究机构等对 BME 专业人才的需求也逐渐增大。

2 BME 专业学生在医院的实习现状

2.1 近 10 年 BME 专业实习相关文献统计

我国 BME 专业现有的教学方式存在理论与实践脱节、实习实践环节受限的弊端, 这也是目前高校工程教育的共性问题。为了更好地阐述国

内 BME 专业学生在医院的实习现状, 本研究通过 CNKI 数据库检索并筛选了近 10 年发表的与 BME 专业实习相关的文献。图 1 是近 10 年 BME 专业实习相关文献发表情况的 Sankey 图, 从图中可以看出, 近 10 年国内发表相关论文共 16 篇, 2015 年发表数量最多, 为 4 篇, 2017 年和 2022 年无相关论文发表, 平均每年发表相关论文 1.6 篇。同时以高校作为第一单位发表的论文共 10 篇, 以医院作为第一单位发表的论文共 6 篇。从内容上看, 高校主要关注校外实习基地建设及校企合作, 而医院则更加关注 BME 专业学生的实习情况。

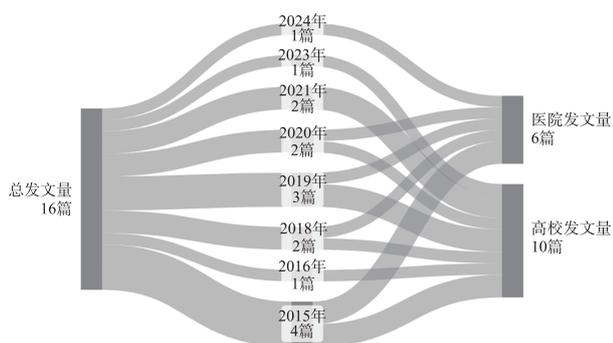


图 1 近 10 年 BME 专业实习相关文献发表情况的 Sankey 图
Fig.1 Sankey diagram of publications on BME internships in the past decade

2.2 BME 专业学生在医院的实习现状及存在的不足

本研究详细查阅了近 10 年发表的与 BME 专业实习相关的文献, 重点关注由医院作为第一单位发表的文献。同时, 结合科室多年带教经验和当下行业实际情况, 对 BME 专业学生在医院的实习现状及存在的不足进行了分析。一直以来, 医院医学工程部门习惯通过跟岗带教的方式培养实习生。在这种带教模式下, 实习生跟随带教老师开展工作, 带教老师在实际工作中向实习生讲解医疗器械的工作原理、结构组成、操作方法及维护维修技巧, 并在适当时候让实习生进行实操。这种教学方式以带教老师为中心, 实习生被动学习, 学习的主动性和积极性不高, 实习效果欠佳。同时, 大多数时候, 带教老师往往凭借个人经验分析判断医疗设备故障所在, 再由实习生进行具体操作, 这种方式取代了实习生自主探索问题的过程, 使其分析问题和解决问题的能力无法得到充分锻炼。此外, 不少科室对

于 BME 专业学生的实习带教工作重视程度不足, 教学内容较为零散, 教学计划未进行统一安排, 导致学生无法形成系统性思维。更糟糕的是, 有些医院甚至将实习生视为免费劳动力, 频繁安排处理科室杂事, 进一步打击了实习生的实习积极性。为了培养具有较强工程实践能力的 BME 专业应用型人才以匹配医疗机构的现代化进程, 医院必须重视对 BME 专业实习生的培养, 并建立科学有效的实习带教体系。

3 基于 Miller 金字塔模型的模块化带教体系构建

3.1 Miller 金字塔模型的基本原理

1990 年, 美国医学教育家 George E. Miller 提出了标志性的 Miller 金字塔模型, 这是目前使用最广泛的评估临床技能、能力和表现的组织框架, 对医学教育产生了直接和持久的影响^[20]。Miller 金字塔模型将临床能力的发展分为四个层级。金字塔的底层是专业理论知识, Miller 认为优秀的临床实践能力必须基于扎实的理论基础, 强调了知识的基础性和重要性, 即学习者必须掌握其履行专业职能所需的知识。金字塔的第二层是知识应用能力, Miller 认为, 仅仅知道是不够的, 学习者还应学会如何使用他们所掌握的知识。金字塔的底层和第二层是临床能力认知成分的不同级别, 可以通过基本书面测试进行评估。金字塔的第三层是操作表现, 代表临床技能, 可以通过在模拟环境中的操作来进行评估。最后, 金字塔的顶层是临床表现, 通过在真实的临床工作环境中直接观察来评估, 用以确定学习者是否有能力在临床情况下独立工作。金字塔较高的两个层级是临床能力的行为成分, 涉及实际操作, 而不是头脑中的演示。图 2 展示了 Miller 金字塔模型的示意图。

Miller 金字塔模型不仅保留了传统的以基础理论知识测试为主的医学教育模式, 还重视学习者的实践表现。作为评估卫生专业学习者能力的组织框架, Miller 金字塔模型反映了医学教育轨迹的各个阶段, 被广泛用作设计教学和学习方案的模板^[21]。基于 Miller 金字塔模型构建的实习医生和实习护士的教学计划和培训方案都取得了令人满意的效果。接受基于 Miller 金字塔模型构建的教学方法的实习

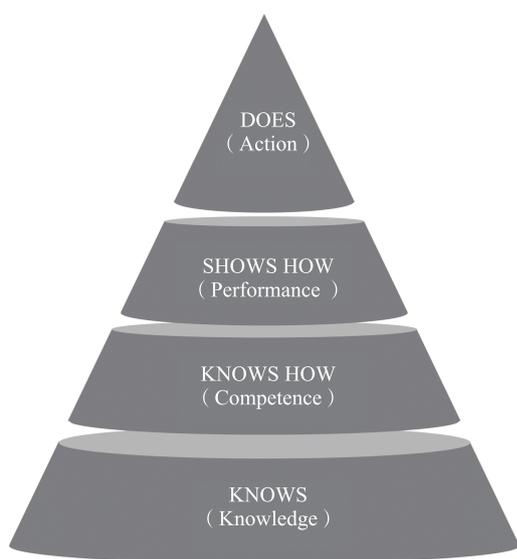


图2 Miller 金字塔模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of Miller's pyramid model

生，其理论及操作考核成绩相较于接受常规教学方法的实习生明显提升，岗位胜任力也显著增强。同时，实习生对新型教学模式的满意程度也较高^[22-25]。因此，可以借鉴 Miller 金字塔模型的原理来设计 BME 专业学生在医院的培养方案。

3.2 BME 专业在医院的实习带教体系构建

为保证 BME 专业学生在医院的实习质量，切实提高其工程实践能力及创新思维，必须构建一套科学、合理的带教体系。然而，目前仍然缺乏规范化的实习带教体系。考虑到现代医疗器械种类繁多、数量庞大，而应用于临床诊疗活动中的医疗器械又可按照功能属性分为四个主要大类，即生命支持与急救类设备、诊断设备、治疗设备和检验设备^[26]。因此，本文提出了基于 Miller 金字塔模型的模块化带教体系。

基于 Miller 金字塔模型的模块化带教体系将 BME 专业学生的实习周期分为四个阶段，每个阶段只学习一类设备中的几种典型或常用设备，以保证实习生在每个学习阶段的专注性。同时，每一类设备的学习采用基于 Miller 金字塔模型的教学方法，切实提高实习生的工程实践能力，保证实习质量。具体而言，在金字塔模型的第一层级，重点学习医疗设备的基础知识，包括设备的工作原理、结构组成、使用方法及常见故障等专业理论知识，由带教

老师通过 PPT 的形式进行授课，实习生亦可自行学习设备的用户手册、维修手册或技术规格说明书等文档。在金字塔模型的第二层级，主要培养实习生对具体医疗设备专业理论知识的应用能力。实习生跟随带教老师进行学习，认真观察带教老师的工作，学习如何运用所学专业理论知识进行故障分析和解决，从而进一步加深对理论知识的理解与应用，并建立起正确的故障维修思路。在这一阶段中，鼓励实习生积极提问，带教老师应耐心答疑解惑。在金字塔模型的第三层级，实习生在带教老师的指导下开展医疗设备故障检修。在此阶段，实习生需利用前两个阶段所学的理论和技能开展工作，带教老师从旁指导，以确保其操作的规范性和安全性。这一阶段的重要性不言而喻，实习时长较前两个阶段可适当延长。在金字塔模型的第四层级，实习生独立开展医疗设备维修工作，开始与科室老师共同承担医疗设备维修业务。此阶段需要带教老师在第三层级的实践中仔细观察并评估实习生的实际操作表现，再逐步过渡到实习生独立完成设备维修工作。这一阶段可以充分锻炼实习生分析问题和解决问题的能力，从而显著提高其工程实践能力，因此，应重点保障该阶段的实习时长。以生命支持与急救类设备中最常见的心电监护仪为例，在第一层级，首先，实习生应掌握设备的组成部分，包括主屏幕、血氧测量导线（连接血氧夹）、心电图测量导线（连接电极片）、血压测量导线（连接袖带）及电源插头等；其次，实习生应熟悉该设备的测量参数及其测量原理，包括心率（HR）、血氧饱和度（SpO₂）、呼吸频率（RESP）及无创血压（NIBP）等；最后，实习生应重点学习设备的常见故障及其解决策略，例如心电图无波形或波形杂乱、SpO₂ 无数值、NIBP 充气不足或测量不准确等故障及应对的维修方法。在第二层级，实习生应跟随带教老师学习，观察带教老师是如何根据故障现象进行故障排除并修复设备，同时，结合所学理论知识，深刻理解心电监护仪的维修技巧并建立起正确的维修思路。在第三层级，实习生应在带教老师的指导下进行心电监护仪的维修。实习生根据前两阶段掌握的理论知识进行故障排除及实际维修操作，涉及机器的拆卸

及检测模块电路板更换等复杂维修时, 带教老师应给予及时的指导。在第四层级, 实习生开始独立完成心电监护仪的故障维修工作。

在实际应用中, 每个学习阶段的周期可以根据高校的实习规定进行合理分配, 每一类设备的学习数量可以根据实习生的学习能力进行灵活安排。当完成一类设备的学习后, 便可开展下一类设备的学习, 以使实习生尽可能掌握更多设备的维修方法。当实习生开始独立承担医疗器械维修工作时, 应要求其每天书写维修报告, 根据维修过程, 详细记录医疗器械的故障现象、故障原因及对应的解决方案。维修报告能够更加全面和真实地记录实习生解决问题的全过程, 书写的过程实际上是一个持续性的自我反思过程, 可以促使实习生主动思考, 提高其学习的积极性, 使实习效果进一步提升。同时, 在整个实习过程中, 医学工程部门还可以充分利用医疗器械供应商资源, 每周开展1次技术讲座或学术活动, 从而开阔实习生的眼界, 启发其创新思维。另外, 典型案例讨论也是该实习带教体系的一个重要环节。可以要求每个实习生选择自身在一个月的学习中所遇到的典型故障案例进行交流讨论, 鼓励其他实习生参与其中, 各抒己见。这种教学方法称为案例教学法 (Case-Based Learning, CBL), 最早由美国哈佛大学商学院提出, 它以实习生为教学主体, 不仅可以显著增强实习生思考问题的主动性, 也可以提升其沟通交流能力。当前, 国内许多医疗机构的医学工程部门都面临着专业技术人员不足、工作任务繁重等问题。因此, 除采用上述带教体系外, 还应积极思考如何在有限的人力资源条件下开展教学工作。一方面, 可以根据不同职称进行带教学生数量分配, 适当增加高级职称老师的带教学生人数。另一方面, 建立教学奖励机制, 将教学工作量与绩效考核挂钩, 提高科室老师的教学积极性。此外, 还可以实行错峰教学, 例如可以利用晨会、午间及下班前半小时等碎片化时间开展微教学。

3.3 实习质量评价体系

科学有效的评价体系是保障 BME 专业学生实习质量的重要抓手。一直以来, 医院医学工程部门并未对 BME 专业学生的实习质量建立有效的评价

标准, 仅通过出勤情况及实习报告等对实习效果进行评价, 评价方法比较单一和主观。本研究针对所构建的带教体系, 提出了对应的实习质量评价方法。这种评价方法更加关注实习过程及综合素质, 同时评价指标也更加多元化, 包括平时表现分 (占比 40%)、技能操作考核分 (占比 40%) 以及实习成果汇报分 (占比 20%)。平时表现部分的考核主要关注实习生出勤情况、学习积极性及团队合作等方面。技能操作考核部分, 由带教老师根据实习内容选择合适的故障设备让实习生现场修复, 带教老师根据实习生的实际操作表现进行打分, 重点关注实习生分析问题和解决问题的能力。实习成果汇报部分的考核是在实习结束前, 组织实习生进行学习成果汇报, 由实习生详细汇报个人在整个实习阶段中的成长经历及学习成果, 带教老师可根据汇报情况提问并由实习生进行答辩, 最后根据整体情况对汇报结果打分。该实习质量评价体系不仅能为更加客观和全面地评价实习生实习成效提供有效支撑, 还能及时发现实习教学中存在的问题, 从而持续推动带教体系的优化升级。此外, 还可以开展实习生对带教老师教学满意度的评分, 以落实带教老师职责, 促进实习教学的规范化。

4 结论

BME 专业学生是临床工程师队伍的主要后备军, 其在医院的实习是高校课堂教学的延伸, 是将工程理论知识转化为工程实践能力的重要阶段。因此, 医院应重视 BME 专业的实习教学, 以社会需求为导向积极构建科学的带教体系, 加强 BME 专业学生工程实践能力的培养。本文的创新点在于提出了一套系统的 BME 专业在医院的实习带教体系, 为实习带教工作的流程化和规范化提供了依据。通过执行该带教体系, 不仅能够更有针对性地指导实习生进行实习, 还可以提高医学工程部门带教老师的教学水平。在湖南省人民医院医学工程部门实习的 BME 专业学生, 其个人工程实践能力相较于入科前均有显著提升, 同时, 实习生对实习教学满意度较高。然而, 在后续工作中, 还需对该带教体系进行积极应用和评估, 并根据实际工作情况对该体系进行完善和改进, 为构建广泛适用的 BME 专业

实习带教体系提供参考。

随着人工智能的发展及大规模集成电路的广泛应用,医疗器械的复杂程度大幅度增加。同时,医疗器械供应商持续强化其售后服务体系,售后服务响应速度越来越快。然而,许多医疗设备在临床使用中处于高负荷运转状态,故障所造成的停机时间成本越来越高。另外,医疗机构逐渐重视设备采购的合规性及配置的合理性。这些因素不断挤压传统维修空间,驱动着临床工程师职责的转变。在这一背景下,医院临床工程师的职责已从单一维修转向全生命周期管理,其核心价值不再局限于维修技能,而是通过设备管理、成本优化、风险管控及临床支持等,实现医疗器械效益最大化。因此,医院医学工程部门带教老师应考虑临床工程师的角色转变,在实习中适当增加医疗器械管理的内容,提升BME实习生的综合素质,增强其岗位胜任力。

参考文献

- [1] MADZIVIRE M, ALOOH M, MAGALHAES BRITO L. F. de, *et al.* Biomedical engineers are crucial for effective health-care systems[J]. *Lancet Global Health*, 2025(13): e396-e398.
- [2] 刘有军, 南群. 论中国高等院校生物医学工程本科专业的核心竞争力[J]. *北京生物医学工程*, 2021(40): 314-317.
LIU Youjun, NAN Qun. Core competencies for undergraduates in biomedical engineering in Chinese universities[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2021(40): 314-317.
- [3] 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]. *生物医学工程学进展*, 2023(44): 319-324.
YU Hailong, QIN Fangyu, ZHENG Zhonghao, *et al.* Discussion on the training of practical ability of undergraduate education of biomedical engineering[J]. *Progress in Biomedical Engineering*, 2023(44): 319-324.
- [4] 常世杰, 苏娟, 李硕, 等. 以“卓越工程师”为目标的生物医学工程专业课程体系改革[J]. *中国医疗设备*, 2014(29): 127-129.
CHANG Shijie, SU Juan, LI Shuo, *et al.* Curriculum reform of biomedical engineering aimed for “excellent engineers” [J]. *China Medical Devices*, 2014(29): 127-129.
- [5] 苏娟, 于璐, 尹勇, 等. 在生物医学工程专业开展基于项目的学习教学改革探讨[J]. *中国医疗设备*, 2013(28): 120-122.
SU Juan, YU Lu, YIN Yong, *et al.* Discussion of teaching reform based on PBL in biomedical engineering[J]. *China Medical Devices*, 2013(28): 120-122.
- [6] 祁富贵, 李钊, 雷涛, 等. 新形势下军校生物医学工程专业地方生教学模式新探索[J]. *北京生物医学工程*, 2023(42): 531-535.
QI Fugui, LI Zhao, LEI Tao, *et al.* Exploration on the new teaching mode for biomedical engineering civil undergraduate in military medical university under new background[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2023(42): 531-535.
- [7] 刘小丽, 刘焕舒, 贾璐, 等. 生物医学工程专业本科生毕业实习课程体系研究[J]. *医疗卫生装备*, 2024(45): 89-94.
LIU Xiaoli, LIU Huanshu, JIA Lu, *et al.* Curriculum system of graduation internship for undergraduate students majoring in biomedical engineering[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2024(45): 89-94.
- [8] CHENG K M, GUO Q, HE Y B, *et al.* Exploring the potential of GPT-4 in biomedical engineering: the dawn of a new era[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2023(51): 1645-1653.
- [9] HANDAYANI M, HENDRIK, ABBAS A, *et al.* Development of graphene and graphene quantum dots toward biomedical engineering applications: a review[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2023(12): 20230168.
- [10] PRESTIGIACOMO R, CHAN C C, KARK L. A biomedical engineering curriculum development: a qualitative study engaging four stakeholders[J]. *European Journal of Education*, 2024, 59(2).
- [11] YANG P, LIU Z Q, QIN S Y, *et al.* A wearable triboelectric impedance tomography system for noninvasive and dynamic imaging of biological tissues[J]. *Science Advances*, 2024(10): eadr9139.
- [12] BAI X, ZHANG Y T, ZHAO H P, *et al.* Flexible X-Ray detector for cumulative dose monitoring through reversible photochromism and luminescence modulation[J]. *Advanced Science*, 2025(12).
- [13] JASINSKI S R, PRESBY D M, GROSICKI C J, *et al.* A novel method for quantifying fluctuations in wearable-derived daily cardiovascular parameters across the menstrual cycle[J]. *Npj Digital Medicine*, 2024(7): 373.
- [14] METWALLY A A, PERELMAN D, PARK H, *et al.* Prediction of metabolic subphenotypes of type 2 diabetes via continuous glucose monitoring and machine learning[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2024, 9(8).
- [15] 董旭, 张晓玲. 中美生物医学工程本科人才培养模式之比较[J]. *医疗卫生装备*, 2013(34): 126-127.
DONG Xu, ZHANG Xiaoling. Comparison of Biomedical Engineering Undergraduate Training Mode between China and USA[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2013(34): 126-127.
- [16] 刘慧强, 樊孝喜, 段颖妮, 等. 探讨“医工结合”对生物医学工程专业发展的现实意义[J]. *教育现代化*, 2017(4): 36-37-62.
LIU Huiqiang, FAN Xiaoxi, DUAN Yingni, *et al.* Exploring the prac-

- tical significance of “combination of medicine and engineering” for the development of biomedical engineering[J]. **Education Modernization**, 2017(4): 36-37+62.
- [17] PEPPERONI E, TRIGILI E, CAPOTORTI E, *et al.* Post-traumatic hand rehabilitation using a powered metacarpal-phalangeal exoskeleton: a pilot study[J]. **Journal of Neuroengineering and Rehabilitation**, 2024(21): 214.
- [18] WANG M, JIA L, JIA X, *et al.* Flexible circuit-free system via passive modulated ultrasound for wireless thoracic pressure monitoring[J]. **Science Advances**, 2025(11): eads5634.
- [19] MONTOYA MIRA J L, QUENTEL A, PATEL R K, *et al.* Early detection of pancreatic cancer by a high-throughput protease-activated nanosensor assay[J]. **Science Translational Medicine**, 2025(17): eadq3110.
- [20] MILLER G E. The assessment of clinical skills/competence/performance[J]. **Academic Medicine**, 1990(65): S63-7.
- [21] TEN CATE O, CARRACCIO C, DAMODARAN A, *et al.* Entrustment decision making: extending Miller’s pyramid[J]. **Academic Medicine**, 2021, 96(2): 199-204.
- [22] 严玉茹, 倪兆慧, 张岚, 等. 基于 Miller 金字塔能力模型的动静脉内瘘围手术期护理能力培训方案的构建 [J]. **中国血液净化**, 2021 (20) : 570-574.
- YAN Yuru, NI Zhaohui, ZHANG Lan, *et al.* Construction of a training program for the nursing ability of perioperative arteriovenous fistula based on the Miller’s pyramid competency model[J]. **Chinese Journal of Blood Purification**, 2021(20): 570-574.
- [23] 赵秀华, 王超, 孙萍, 等. 基于 Miller 金字塔能力模型的可视化教学在手术室实习护生无菌技术教学中的应用 [J]. **齐鲁护理杂志**, 2024 (30) : 151-154.
- ZHAO Xiuhua, WANG Chao, SUN Ping, *et al.* Application of visual teaching based on Miller’s pyramid competency model in the teaching of aseptic technology for nursing students in operating rooms[J]. **Journal of Qilu Nursing**, 2024(30): 151-154.
- [24] 刘晓刚, 彭曦桐, 郭五军, 等. 基于 Miller 金字塔原理的模拟教学法对内科住院医师及实习医生的影响 [J]. **中国继续医学教育**, 2024 (16) : 102-106.
- LIU Xiaogang, PENG Xitong, GUO Yujun, *et al.* Observation on the application of simulation teaching under Miller’s pyramid principle in the teaching of internal medicine residents and interns[J]. **China Continuing Medical Education**, 2024(16): 102-106.
- [25] 牟迎东, 殷亮, 李金, 等. Miller 金字塔教学结合 PBL 教学在急诊实习医师教学中的运用效果 [J]. **中国卫生产业**, 2024 (21) : 174-177.
- MOU Yingdong, YIN Liang, LI Jin, *et al.* Application effect of Miller’s pyramid teaching combined with PBL teaching in the emergency intern teaching[J]. **Chinese Health Industry**, 2024(21): 174-177.
- [26] LIN Z, KANG J, WEI Y, *et al.* Maintenance management strategies for medical equipment in healthcare institutions: a review[J]. **BME Horizon**, 2024(2): 135.