A Portable Six-Lead ECG Monitoring Method Integrating an Age-Debiasing Algorithm*

FENG Chenran, ZHAO Yunping, YANG Haining*
(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: With the deep integration of artificial intelligence and the Internet of Medical Things, home based ECG monitoring devices are playing an increasingly important role in the early warning of cardiovascular diseases. To address the age distribution bias presented in existing public ECG datasets, a portable six-lead ECG monitoring method is proposed, which integrates an age-debiasing algorithm. Based on six-lead ECG signals, the method incorporates a deep learning model for realtime arrhythmia alerts and introduces an adversarial debiasing mechanism into the algorithm design. By employing an adversarial debiasing strategy during model training, the model is constrained to learn ECG features grounded in pathological morphology rather than being confounded by age labels. To ensure standardized signal acquisition, a commercial six-lead ECG device is adopted for data collection during the algorithm validation stage. Experimental results show that the method improves the arrhythmia detection rate among young populations by approximately 60% while maintaining the overall diagnostic accuracy, offering a new approach for building fair and accurate personalized healthcare systems.

Key words: ECG monitoring; six-lead; algorithmic fairness; age bias; machine learning
EEACC: 7220; 7510D **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.017

融合去年龄偏见算法的便携式六导联心电监测方法*

冯宸然, 赵允平, 杨海宁*
(东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 随着人工智能与医疗物联网的深度融合, 居家心电监测设备在心血管疾病早期预警中发挥着重要作用。针对现有公开心电数据集存在的年龄分布偏差问题, 提出了一种融合去年龄偏见算法的便携式六导联心电监测方法。该方法在六导联心电信号基础上, 集成深度学习模型实现实时心律失常预警, 并在算法设计中引入对抗性去偏见机制。通过在模型训练阶段采用对抗性去偏见策略, 约束模型学习基于病理形态的心电特征, 而非受年龄标签干扰。为保证信号采集的标准化, 算法验证阶段采用商用六导联心电设备进行数据获取。实验结果表明, 该方法在保持总体诊断准确率的同时, 将年轻人群的心律失常检出率提升了约 60%。为构建公平、精准的个性化医疗系统提供了新的思路。

关键词: 心电监测; 六导联; 算法公平性; 年龄偏见; 机器学习
中图分类号: TN911.7; TP183 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0823-06

心血管疾病(Cardiovascular Disease, CVD)多年来一直是全球范围内的主要死因, 而可穿戴心电监测设备的普及为早期预警提供了新的可能。在过去几十年中, 老年人群一直是心血管疾病的高危群体, 也是心电监测设备研发的主要目标人群[1-2]。然而, 近年来的流行病学研究表明, 过去二十年间, 全球青年人群(15 岁~44 岁)的心脏病发病率和心肌梗死死亡率呈现明显的上升趋势[3-5]。

由于危险因素和生理差异, 青年人群与老年人群的心脏病早期表现存在显著差异。老年人群的心脏病是生理性衰老与病理性改变长期累积的结果, 常伴有心绞痛等预警症状; 而青年人群则常表现为突发性血栓事件[6], 其血管通常无明显狭窄, 症状隐匿。青年人群症状隐匿的特点, 使得基于心电的早期预警对其尤为重要。

然而, 在便携心电监测领域, 当前主流的 AI 心电分析模型存在显著的“年龄偏见”。其根本原因在于, 用于训练这些模型的公共心电数据集在年龄分布上存在严重偏差。以最广泛使用的 MIT-BIH 心律失常数据库为例, 约 82%的心电记录来自 50 岁

项目来源: 省级 SRTP 项目(S202510286229)
收稿日期: 2026-04-04 **修改日期**: 2026-05-02

以上的中老年受试者,而 50 岁以下青年人群的样本占比约 18%[7]。这种有偏的数据分布导致模型在学习过程中将“疾病特征”与“年龄特征”高度耦合,使得模型在应用于年龄分布不同的群体(特别是青年人群)时,泛化性能显著下降,造成漏诊风险的不公平分配。

针对上述问题,本文提出了一种融合去年龄偏见算法的便携式六导联心电监测方法。该方法基于六导联心电信号,集成深度学习模型,并在算法设计中引入对抗性去偏见机制,主动消除模型对年龄特征的依赖,从而提升青年人群心律失常的检出公平性。目前,以“算法公平性”视角切入六导联心电监测的研究,国内外尚未见到同类公开报道。

本文的主要贡献如下:构建了预处理、训练、后处理三级协同的偏见缓解框架——预处理阶段采用重加权方法修正数据分布,训练阶段引入对抗性去偏见机制约束模型学习年龄无关的病理特征,后处理阶段采用校准均衡几率方法优化决策阈值。在此基础上,本文构建了包含公开数据集与外部青年志愿者实测数据的双重验证体系,系统评估了该方法对青年人群诊断公平性的提升效果。

本文后续内容安排如下:第 1 节介绍系统总体设计;第 2 节阐述神经网络分类及去偏见算法的实现;第 3 节描述验证实验过程;第 4 节对公平性与准确性指标进行对比分析;第 5 节总结全文。

1 系统方案与算法验证框架

本文提出的面向年龄公平性的便携式六导联心电监测系统,基于一款嵌入式六导联心电设备(以下简称 Young-Heart 系统)构建。Young-Heart 系统集成于综合的家庭医疗体系,是按照医疗物联网(IoMT)范式设计的智能便携式医疗设备。

1.1 六导联心电信号采集

本文所依托的六导联心电采集方案采用三电极设计:使用时将设备主体放置于左膝上方,双手分别捏住左右两端的电极触点,即可同时获取右臂(RA)、左臂(LA)和左腿(LL)三路原始心电信号(见图 1)。设备内部通过模拟多路复用器与模拟开关实现高频循环采样,根据标准肢体导联理论(计算公式见表 1),实时计算并重构出全部六个肢体导联的信号(I、II、III、aVR、aVL、aVF)。三电极方案在保证信号连续性的同时,降低了硬件复杂度,提升了患者依从性,为后续去偏见算法的部署提供了多通道心电特征输入。

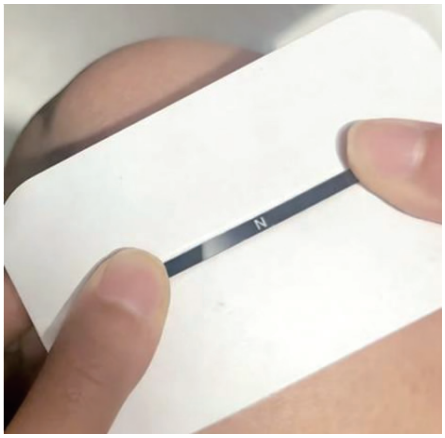

图 1 三电极(RA、LA、LL)采集原始信号

表 1 标准肢体导联计算公式

导联	计算公式
I	LA-RA
II	LL-RA
III	LL-LA
aVR	-(I+II)/2=RA-(LA+LL)/2
aVL	I-II/2=LA-(RA+LL)/2
aVF	II-I/2=LL-(RA+LA)/2

1.2 数据采集与算法验证平台

本文的核心贡献在于去年龄偏见算法。为保证模型训练与验证阶段心电信号的标准化和质量可控,算法验证阶段采用商用六导联心电设备 KardiaMobile 6L EKG(AliveCor,美国)进行数据采集。该设备基于三电极方案输出 I、II、III、aVR、aVL、aVF 六导联心电信号,与本研究的六导联架构一致,确保算法迁移时不产生结构偏差。采用已获 FDA 批准的成熟商用设备作为信号采集前端,使算法性能评估能够独立于自研硬件的工程成熟度,从而更加客观地反映去偏见算法本身的真实效果。

1.3 基于医疗物联网架构的系统应用

按照医疗物联网(Internet of Medical Things, IoMT)的范式[8],系统将六路肢体导联心电信号数据通过蓝牙实时传输至云端诊断中心,实现连续健康监测。当算法检测到危险状态(如心房颤动)时,移动应用程序向患者发出警报,并将位置信息和心电数据共享至医疗中心,实现院前与院内救治的无缝衔接。通过在家庭和基层医疗机构部署可穿戴心电设备,IoMT 发挥其在院外心电筛查中的独特优势,有望缩短危急事件的平均响应时间(见图 2)。

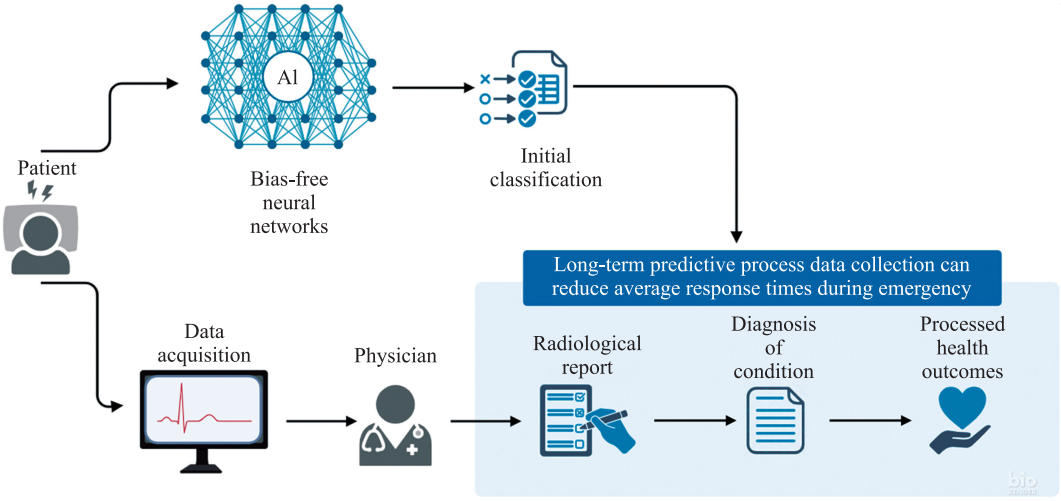

图 2　IoMT 范式下的医疗诊断与 AI 协同工作流程

2　面向年龄公平性的机器学习算法

这是本文的研究重点。为实现异常心脏活动的诊断与分类,本研究集成了机器学习网络[9]。机器学习方法依赖于大量数据输入,但当数据分布不平衡时,结果可能受到歧视性影响,产生不公平性[7]。

2.1　分类神经网络训练

为实现心电图的五分类任务——正常搏动(N)、房性早搏(A)、室性早搏(V)、左束支传导阻滞(L)、右束支传导阻滞(R),本研究采用了一维卷积神经网络[10],包含三个卷积层和两个全连接层。

如图 3 所示,第一卷积层包含 32 个滤波器,第二层包含 64 个滤波器,最后一层包含 128 个滤波器,逐步提取高阶心电特征。浅层卷积学习边缘和基本波形,深层卷积学习复杂心律模式。

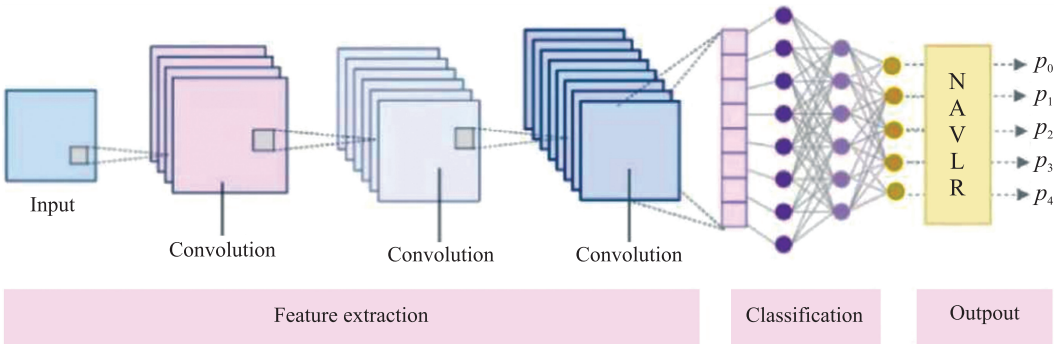

图 3　心电分类神经网络结构

2.2　三种年龄偏见缓解技术

用于训练神经网络的数据通常包含偏见。心脏病常被视为主要影响老年人群的疾病[1-2],导致青年患者临床病例被低估。对于医疗系统而言,这种年龄偏见构成了显著的临床风险。青年人群的心脏病往往更为隐匿、发作更为突然[6],如青年猝死综合征。因此,本算法的核心目标是提升青年人群心脏异常的检出率,确保不同年龄群体获得公平的诊断服务。

然而,心电分类研究中最广泛使用的基准数据集——MIT-BIH 心律失常数据库[11]存在显著的人口统计学偏差。该数据集中约 82%的受试者为 50 岁以上的中老年人群,而 50 岁以下的受试者仅占约 18%。这种数据不平衡导致在该数据集上训练的深度学习模型对年轻人群表现不佳。

针对机器学习过程的不同阶段,本算法部署了三种偏见缓解方法[12]:

①预处理阶段:采用重加权方法修改数据分布。通过应用反比例加权,样本量较少的年轻人群在训练中获得更高的权重,约束模型在优化损失函数时优先学习年轻样本的特征,从而增强其对青年心律失常的识别能力。

②训练阶段:引入对抗性去偏见,增加公平性约束。网络分为两个分支:主分类器处理心律失常分类,年龄判别器从特征中预测年龄组。梯度反转层在反向传播时反转年龄判别器的梯度,将其馈送至

特征提取器。通过这种对抗性训练,模型学习到不受年龄相关偏见影响的特征,实现对不同年龄个体的公平识别能力。

③后处理阶段:采用校准均衡概率方法。通过调整预测概率阈值,使不同群体间的真正例率(TPR)和假正例率(FPR)对齐,降低数据偏见引起的误诊和漏诊概率。

本算法的核心创新在于利用 AIF360 工具构建闭环自适应优化框架[12]。如图 4 所示,第一阶段计算不同年龄组的公平性指标;第二阶段通过将指标与预设阈值比较进行偏见检测;第三阶段应用参数调整,自动修改阈值和权重参数;第四阶段进行效果验证,比较优化前后的指标变化。循环迭代直至达到公平性目标或达到最大迭代次数。

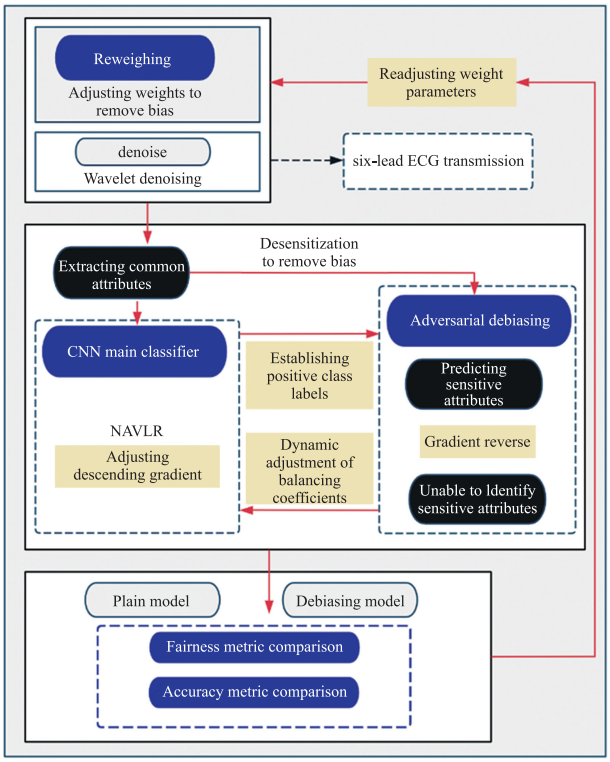

图 4 基于对抗性去偏见的心电分类模型训练框架

3 实验设计

招募了 30 名青年志愿者(男性 15 名,女性 15 名;平均年龄 24±5 岁,BMI 20.57±2.03 kg/m^2)。纳入标准为:青年人群(18-30 岁)、BMI 低于 25 kg/m^2、健康状况良好、符合体力活动指南要求[13]。排除先天性心脏病或存在心脏疾病的个体。本研究遵循《赫尔辛基宣言》的伦理原则,所有参与志愿者均签署知情同意书。

志愿者在三种标准化条件下使用设备:①起床后 1 h~2 h,建立稳定的血流动力学基线;②5 min 运动后立即测量,评估心电图变化;③保持清醒至凌晨 1:00—2:00,评估心脏自主调节的昼夜节律变化[14]。

4 结果与讨论

4.1 模型性能与公平性评估

4.1.1 疾病定义与数据集标注

本研究采用 MIT-BIH 心律失常数据库进行模型训练与测试,该数据库包含 48 条心电记录,每条记录由两名以上心内科专家进行逐搏标注。本研究聚焦于五分类任务,各类别定义如下:

①N(正常搏动):窦性心律,无异常;

②A(房性早搏):起源于心房的提前搏动;

③V(室性早搏):起源于心室的提前搏动;

④L(左束支传导阻滞):心室激动沿左束支传导延迟;

⑤R(右束支传导阻滞):心室激动沿右束支传导延迟。

在本研究的“疾病检出”评估中,将 A、V、L、R 四类均视为异常心搏(即“疾病”状态),N 类视为正常。因此,真正例(TP)定义为模型正确识别出异常心搏的样本。

4.1.2 评价指标定义

为全面评估模型性能与公平性,本研究采用以下五类评价指标:

①总体准确率(Accuracy):所有样本中正确分类的比例。

②平衡准确率(Balanced Accuracy):各类别召回率的平均值,用于消除类别不平衡对准确率评估的影响。

③均衡机会差异(Equal Opportunity Difference,EOD):衡量不同群体间真正例率(True Positive Rate,TPR)的差异,反映模型对真正患病者的识别公平性。计算公式为:

$$EOD=|TPR_{young}-TPR_{elderly}|$$

值越小,表示模型对不同年龄群体的漏诊率越均衡。

④平均赔率差异(Average Odds Difference,AOD):衡量不同群体间真正例率与假正例率(False Positive Rate,FPR)差异的平均值,综合反映模型的误判公平性。计算公式为:

$$AOD=\frac{1}{2}(|TPR_{young}-TPR_{elderly}|+|FPR_{young}-FPR_{elderly}|)$$

值越小,表示模型对不同群体的误判更加均衡。

⑤泰尔指数(Theil Index):衡量模型性能在不

同群体间的分布不平等程度,值越小表示性能分布越均衡。

4.1.3　实验结果

图 5 展示了基准模型和去偏见模型在分类性能和公平性指标上的比较。

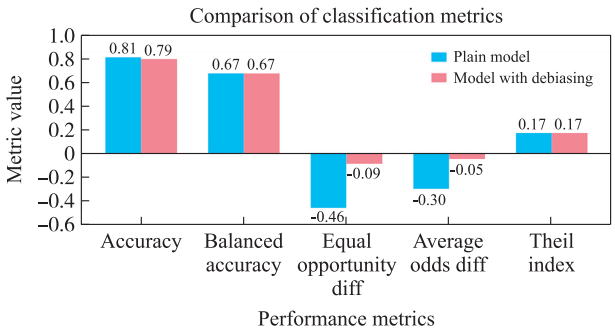

图 5　基准模型和去偏见模型的性能指标对比

从图 5 可以看出:

①准确率方面:去偏见模型的总体准确率从 0.81 下降至 0.79,降幅为 2.5%,平衡准确率保持不变(0.67),表明去偏见处理对整体分类性能影响较小。

②公平性方面:均衡机会差异(Equal Opportunity Difference,EOD)从 -0.46 降至 -0.09,改善幅度达 80.4%,意味着模型对老年与青年群体的漏诊率差异大幅缩小;平均赔率差异(Average Odds Difference,AOD)从-0.30 降至-0.05,改善幅度达 83.3%,表明模型对不同群体的误判更加均衡。

③分布平等性方面:泰尔指数 0.17 保持不变,表明模型公平性的提升并未导致新的整体分布不公。

综合以上结果,去偏见模型在仅以 2.5%准确率损失的微小代价下,实现了公平性指标的显著提升,证明了该方法在保持分类性能的同时有效缓解了年龄偏见。

4.2　泛化能力验证

为进一步验证缓解偏见算法的泛化能力,本研究比较了训练集内部验证与测试集外部验证的效果。如图 6 所示,在训练集内(比较 MIT-BIH 青年

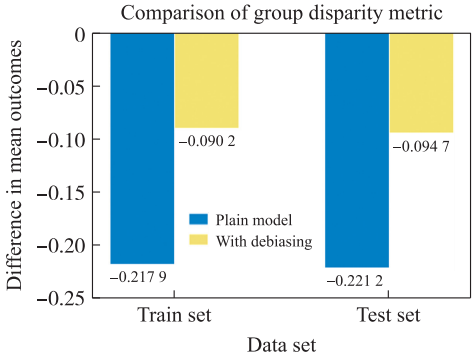

图 6　基准模型和去偏见模型的预测差异改善对比

亚组与总体人群),组间预测差异改善了 59%;在完全独立的外部测试集(30 名青年志愿者)上,改善幅度为 57%。两种验证方式下改善率几乎一致,表明缓解偏见方法能够将从 MIT-BIH 学到的缓解偏见策略成功迁移至完全独立的青年人群。

综合以上结果,将缓解偏见算法集成到神经网络中可以显著提高不同年龄组的预测公平性。原本,青年人群的心脏病检出率比老年群体低约 22%。经过优化,这一差距缩小至约 9%,意味着青年人群漏诊风险降低了约 60%。

5　结论

本文提出了一种缓解现有心电数据集中数据偏见的实用解决方案。该方法基于医疗物联网架构的六导联便携设备,不仅能够监测心脏活动并实时上传心电信号实现连续健康监测,还集成了缓解偏见的机器学习算法。这一设计能够准确预测心脏疾病的早期迹象,特别是对于长期被忽视的青年人群。

通过缓解影响青年人群诊断准确性的年龄偏见,本研究推动了个性化医疗的发展。本文提出的去年龄偏见方法可迁移至其他医疗 AI 场景,有望应用于解决性别等其他维度的数据偏见问题。

参考文献:

[1] Ruan Y,Guo Y F,Zheng Y,et al. Cardiovascular disease (CVD) and Associated Risk Factors Among Older Adults in Six Low and MiddleIncome Countries: Results from SAGE Wave 1[J]. BMC Public Health,2018,18(1):778.

[2] Mattiuzzi C,Lippi G. Worldwide Disease Epidemiology in the Older Persons [J]. European Geriatric Medicine, 2020,11(1):147-153.

[3] Wang Y,Sun X,Zhang X,et al. Global,Regional,and National Burden of Early Onset Ischemic Heart Disease: Trends and Projections Among Adults Aged 1544 Years from 1990 to 2046[J]. Frontiers in Cardiovascular Medicine,2025,12:1653335.

[4] Wadhera R K,Dhruva S S,Bikdeli B,et al. Cardiovascular Statistics in the United States, 2026: JACC Stats [J]. Journal of the American College of Cardiology, 2026, 87 (19):1094-1134.

[5] Khalil M,Dulal D,Younes A,et al. Trends of Myocardial Infarction in Young Patients[J/OL]. Cardiovascular Revascularization Medicine,(2026-01-26). https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/Pii/S1553838926000151.

[6] Rojas Peláez A,Sevilla Torres E,Fernandez Vinocour D, et al. Benign Early Repolarization Phenomenon in Young Adults and Athletes: A Literature Review of Clinical In-

sights and Diagnostic Considerations[J]. Cureus, 2025, 17(8): e90581.
[7] Mehrabi N, Morstatter F, Saxena N, et al. A Survey on Bias and Fairness in Machine Learning[J]. ACM Computing Surveys, 2021, 54(6): 115.
[8] Doe N, Scharoba S, Reichenbach M, et al. Comparison of Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, Serial and 5G in IoMT[C]//2025 18th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies, Porto, Portugal, 2025, 2: 859-866.
[9] Hannun A Y, Rajpurkar P, Haghpanahi M, et al. Cardiologist-level Arrhythmia Detection and Classification in Ambulatory Electrocardiograms Using a Deep Neural Network [J]. Nature Medicine, 2019, 25(1): 65-69.
[10] Kiranyaz S, Avci O, Abdeljaber O, et al. 1D Convolutional Neural Networks and Applications: A Survey[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 151: 107398.
[11] Goldberger A L, Amaral L A N, Glass L, et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals[J]. Circulation, 2000, 101(23): e215-e220.
[12] Bellamy R K E, Dey K, Hind M, et al. AI Fairness 360: An Extensible Toolkit for Detecting, Understanding, and Mitigating Unwanted Algorithmic Bias[J]. IBM Journal of Research and Development, 2018, 63(4-5): 4: 1-4: 15.
[13] Bull F C, Al-Ansari S S, Biddle S, et al. World Health Organization 2020 Guidelines on Physical Activity and Sedentary Behaviour[J]. British Journal of Sports Medicine, 2020, 54(24): 1451-1462.
[14] Brito L, Shea S, Thosar S. Circadian Rhythm in Cardiac Baroreflex Effectiveness Contributes to Low Systolic Blood Pressure During the Biological Night in Young Healthy Adults[J]. Physiology, 2025, 40(S1): 1939.

冯宸然(2004—),女,东南大学电子科学与工程学院本科生,213233887@seu.edu.cn;

赵允平(2004—),男,东南大学电子科学与工程学院本科生,213230741@seu.edu.cn;

杨海宁(1986—),男,东南大学电子科学与工程学院,教授,主要从事空间光场调控技术以及其在信息显示、光通信、光交换领域的研究工作,h.yang@seu.edu.cn。