

# 耳机式物联网血氧监护系统的设计

薛俊伟<sup>1</sup>, 吴凯<sup>2,3</sup>, 周静<sup>3,4</sup>

1. 广州医科大学科研实验中心, 广东 广州 511436; 2. 华南理工大学生物医学科学与工程学院, 广东 广州 511442; 3. 华南理工大学国家人体组织功能重建工程技术研究中心, 广东 广州 510006; 4. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510006

**【摘要】**分析远程医疗在应对突发公共卫生事件时,快速优化基层医疗资源配置的能力,设计基于蜂窝物联网通信的血氧监护系统。相比于传统医用血氧检测仪器,具有可穿戴、低成本、易操作的优势,更适应基层快速检测或用户居家监测的场景。创新设计了入耳式耳机检测模式,可同时测量体温数据,并通过窄带物联网传输到数据库,积累的数据能够为诊疗提供个性化的追踪记录。

**【关键词】**远程医疗;物联网;入耳式;血氧

**【中图分类号】**R318.6;TP311.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)01-0060-06

## Design of in-ear blood oxygen saturation monitoring system based on internet of things

XUE Junwei<sup>1</sup>, WU Kai<sup>2,3</sup>, ZHOU Jing<sup>3,4</sup>

1. Scientific Research Center, Guangzhou Medical University, Guangzhou 511436, China; 2. School of Biomedical Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China; 3. National Engineering Research Center for Tissue Restoration and Reconstruction, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 4. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** When dealing with public health emergencies, telemedicine can optimize the allocation of medical resources of primary healthcare institutions quickly. Therefore, a blood oxygen saturation monitoring system based on cellular internet of things is designed in the study. Compared with the traditional medical blood oxygen saturation monitors, the system is wearable, low-cost and easy-to-operate, and it is more suitable for the scenario of rapid detection at the primary healthcare institutions or user monitoring at home. The in-ear earphone model makes the detection module innovatively. Both blood oxygen saturation and body temperature can be obtained simultaneously, and the monitoring data are transmitted to the database through narrow band internet of things. The accumulated data provides effective support for personalized diagnosis and treatment.

**Keywords:** telemedicine; internet of things; in-ear; blood oxygen

### 前言

经历新型冠状病毒肺炎疫情等重大突发公共卫生事件,医工结合在医疗大数据运用、智慧医疗产品研发、数字化疫情防控等方面发挥了难以替代的作

用,显现出独特的优势。后疫情时代,随着医保改革政策的不断落地,整个社会的就医理念和诊疗模式都在发生巨大转变。此外,人口老龄化已成为影响生命健康和生活质量的重大公共卫生问题。预计到2050年我国65岁以上人口将达3.93亿人,老年人疾病的预防也带动了远程医疗监测服务的需求不断增长<sup>[1]</sup>。叠加疫情等方面的影响,同时得益于飞速发展的电子信息技术、计算机网络技术、人工智能技术,远程医疗的普及速度也在加快。仅从2019年末起的半年时间内,国内远程医疗行业提供商就增加约450家。医院也更加积极主动地建设互联网医院和远程问诊平台,开通线上线下相融合的诊疗模式,以适应医疗需求的变化。远程医疗可以打破时空限制,优

**【收稿日期】**2023-10-18

**【基金项目】**国家重点研发计划(2022YFF0607800,2022YFF0607804);  
广东省高等教育学会实验室管理专业委员会研究基金  
(GDJ20220330)

**【作者简介】**薛俊伟,硕士,高级工程师,研究方向:智能仪器仪表,E-mail: xjw@gzhmu.edu.cn

**【通信作者】**周静,博士,研究方向:生物医学信号处理、医学人工智能等,E-mail: hellozj@scut.edu.cn

化医疗资源配置,在相对欠发达地区迅速构建起数字化、智能化的专家诊疗服务,重塑医疗卫生系统的运转模式<sup>[2]</sup>。第5代移动通信技术提供高性能无线接入、边缘计算、网络切片等服务能力,为包括远程医疗在内的应用场景提供更好的支撑<sup>[3-4]</sup>。其中,医学影像传输、在线视频会诊等对通讯带宽和时延要求较高的场景,通过5G新空口网络或虚拟专网进行通信;另外,远程生命体征监测、身体局域网(Wireless Body Area Network, WBAN)、医疗仪器组网互联、电子病例系统等可以借助如窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)的低功耗、低时延、大容量等特性实现<sup>[4]</sup>。

本文阐述了基于NB-IoT的入耳式耳机血氧饱和度(Oxygen Saturation, SpO<sub>2</sub>)监护系统的设计,设备主要硬件采用MAX86160集成式血氧监测传感器模块、CT7117数字温度传感器、BC28物联网通讯模块和MSP430低功耗处理器,通过锂电池供电,数据经运营商蜂窝物网络传输到后台。物联网通讯模块与血氧监测传感器模块分离放置,射频天线远离血氧检测电路,以减少信号干扰。此外,入耳式耳机的可穿戴实现样式,满足了WBAN下运动健康的监测需求。

1 系统设计

1.1 系统框架

基于NB-IoT的耳机式血氧监护系统,包含耳机式血氧检测仪、智能终端应用软件和数据服务器等,采用“云-边-端”协同的医疗物联网架构实现系统功能<sup>[5]</sup>。系统设计用于监测用户血氧饱和度和体温等生理参数,并可通过后台服务器的自动分析,扩展日常保健、医疗急救等功能。分布式部署在不同用户的可穿戴血氧监测“端”,将监测到的数据通过NB-IoT网络传输到“边”缘服务器群,数据借助边缘计算能力实现解析分发,暂存到数据服务器,被授权的医生或专家则可以在“云”上远程查看用户数据,并随时跟踪管理用户的健康信息<sup>[6]</sup>。本血氧监护系统的模拟测试实例中,“边”部署在进行测试验证的学校各附属医疗单位机房,“云”部署在学校本部中心机房。用户在智能终端APP中,可以调阅自身健康情况,以及在线咨询医生。系统可设置报警阈值,根据专家判断或机器学习的辅助决策,当监测到生理参数发生异常,或者用户主动发送救助信息时迅速启动协助服务,APP通过系统后台将当前监测数据发送给医生及其监护人。基于NB-IoT的耳机式血氧监护系统整体框架图如图1所示。

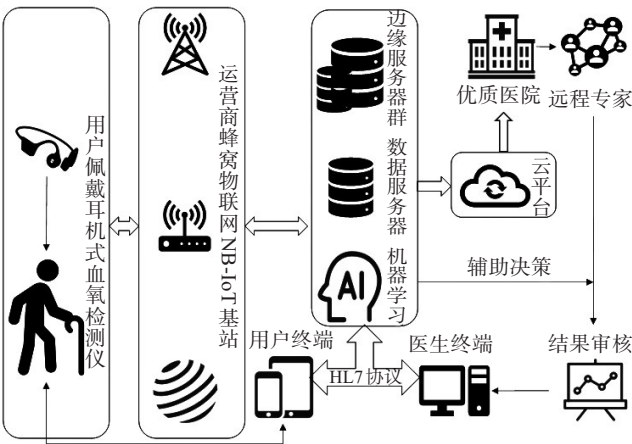


图1 系统功能实现框架图  
Figure 1 Framework diagram of system function implementation

1.2 血氧检测仪

1.2.1 血氧检测原理 血氧饱和度是人体呼吸循环、血液循环的重要生理参数之一,它的检测通常分为有创的血气分析电化学测量法和无创的动脉脉搏波分析光学测量法。其中,光学测量法根据比尔-朗伯定律(Beer-Lambert Law)测出不同氧合血红蛋白比例下血液对光的吸收情况,间接得到血氧饱和度,精度稍低,但有无创、卫生、安全等优势<sup>[7]</sup>。自20世纪40年代第一台光学测量法血氧仪诞生以来,随着电子信息技术的发展,指夹式、耳夹式等可穿戴形态的血氧仪相继被研制出来,可满足多场景下用户连续血氧测量的需求。例如,采用高精度、低功耗芯片设计的物联网血氧检测仪,在家庭监护、基层防疫、智慧养老等场景都有广泛应用。

本设计使用660 nm红光(R)和940 nm红外光(IR)双色LED测量SpO<sub>2</sub>。图2所示是分立元件构成的物联网血氧检测模块原理框架图,主要包含主控单元、双色光LED驱动电路、数字噪声消除电路、环境光干扰消除电路、交互外设(按键、存储器等)和物联网通讯模块。考虑到生物组织是一种复杂光学系统,不完全符合经典Beer-Lambert Law,因此假定血液中只存在氧合、非氧合两种血红蛋白,当红光LED、红外光LED按一定时序交替发光时,不同种类血红蛋白对这两种波长光线的吸收率有明显差异。将接收到的双色光反射信号强度交流分量分别计为I<sub>R(AC)</sub>、I<sub>IR(AC)</sub>,直流分量分别计为I<sub>R(DC)</sub>、I<sub>IR(DC)</sub>。以Beer-Lambert Law推导,红光部分交流直流比与红外光部分交流直流比的相对变化值,与SpO<sub>2</sub>呈线性关系<sup>[8]</sup>。可得,血氧饱和度计算公式为:

$$SpO_2=A \cdot B \cdot \frac{I_{R(AC)} / I_{R(DC)}}{I_{IR(AC)} / I_{IR(DC)}} \tag{1}$$

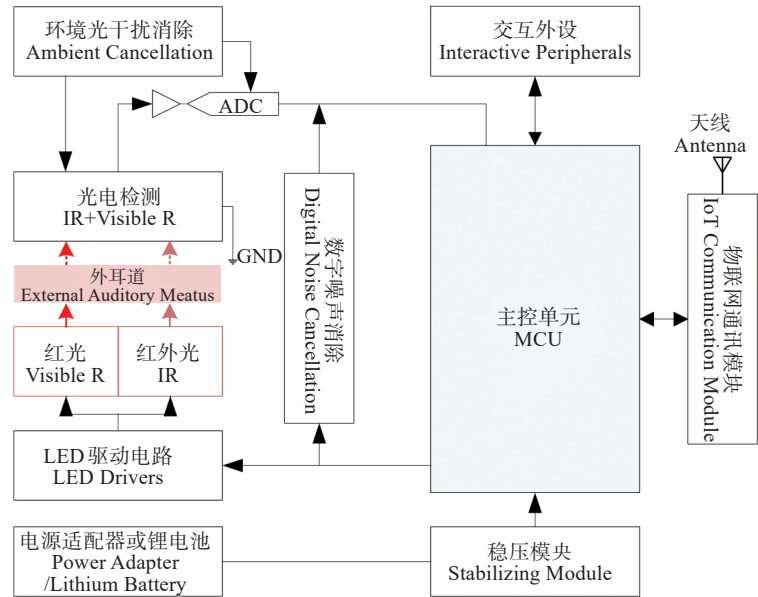


图 2 血氧检测模块原理框图  
Figure 2 Block diagram of blood oxygen saturation monitoring module

其中,  $A$ 、 $B$  是经验值拟合系数, 可通过试验定标得出<sup>[9]</sup>。一般地, 将推荐经验值  $A=110$ ,  $B=25$  写入检测程序, 再根据实际调试数据拟合出更优的系数, 测出更精确的  $SpO_2$  值。

**1.2.2 血氧仪设计** 使用分立元件完成穿戴式血氧检测设备是不现实的。基于小尺寸、低功耗、医疗级、可穿戴等特殊需求, 设计使用 ADI 公司医疗级 MAX86161 集成式血氧监测传感器模块和申矽凌微电子公司 CT7117 数字温度传感器, 可在有限空间内提供高度集成的低成本、高精度血氧和体温数据检测<sup>[10-11]</sup>。血氧监测传感器模块与物联网通讯模块分别放置在耳机两侧, 尽量使射频天线远离血氧检测电路以减少高频信号对检测结果的干扰<sup>[12]</sup>。本系统需满足运动状态下的无线数据采集, 因此采用两块典型容量为 55 mAh 的钢壳扣式电池组进行血氧检测仪供电, 以保证续航<sup>[13]</sup>。图 3 是物联网血氧检测仪一种典型实现方式样式图。

1.3 数据通讯

BC28 NB-IoT 无线通信模块是一款经三大运营商入库认证的高性能物联网模组, 同时兼具超小尺寸和超低功耗的特性, 能满足本设计中耳机式血氧检测仪的即时物联“端-边”通信要求, 在运动模式下也能提供电信级别的长时间稳定连接。BC28 支持 B1/B3/B8/B5/B20/B28 频段, 且内嵌包含 CoAP/MQTT 等在内的网络服务协议栈, 方便目标设备快捷开通物联网功能<sup>[14]</sup>。通过 BC28 模块, 物联网血氧检测仪将检测到的血氧和体温数据以特定格式传送至医疗机构服务器。为保障数据传输的可靠性, MSP430 低功耗处理器将监测数据暂存至存储器, 通过程序设置断点续传功能, 在通讯恢复后及时从断点续传数据<sup>[15]</sup>。此外, 生理参数异常报警事件的相关信息, 如时间、位置、用户 ID 等基本信息, 则是依赖于智能终端 APP 与云平台共同获取<sup>[16]</sup>。

1.4 平台部署

监护平台是整个“云-边-端”协同医疗物联网架构的中枢, 通常主要功能集中在“云-边”部分对检测数据的处理和使用。以基于 NB-IoT 的耳机式血氧监护系统为例, 从大量血氧检测仪中采集到的数据, 首先通过 NB-IoT 网络传输到边缘服务器群, 打包为 HL7 格式数据实时发送给分布式大数据流处理系统 Apache Flume 做报文解析, 经 Apache ActiveMQ 信息系统与后台数据中心进行可靠通信, 在 Spark SQL 中实现数据存储<sup>[17]</sup>。Apache Flume 是收集、聚合流事件的分布式系统, 内置许多源、通道和接收器, 可伸缩性较强, 适用于并发数据的采集; Apache

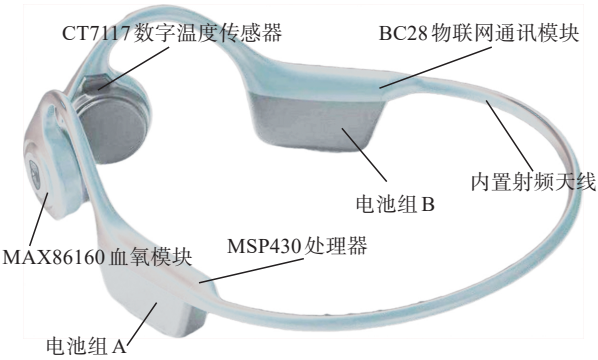


图 3 物联网血氧检测仪样式图  
Figure 3 Sample diagram of blood oxygen saturation monitor based on internet of things

ActiveMQ 信息系统是一种支持多种传送协议的开源消息总线,在设计上使用多种方式保证消息持久化机制的可靠性,同时兼顾大数据时代低延迟、高性能的计算需求<sup>[18]</sup>。Spark SQL 作为分布式内存计算 SQL 查询引擎,在结构化数据处理时可以实现快速计算。综合考量医疗数据全生命周期管理中可能存在的各类数据质量隐患,兼顾传输的安全、可靠和效率,使用上述分布式大数据流处理技术搭建的物联网数据流系统如图 4 所示,解决并行采集、即插即用、多路传输、快速计算、分布处理等问题。更进一步地,系统可扩展机器学习和图计算功能,如结合 Spark Mlib 进行机器学习,通过 Spark GraphX 实现图计算和图挖掘<sup>[19]</sup>。



图 4 系统数据流  
Figure 4 Data flow of the system

1.5 统计学方法

使用 SPSS 进行统计学分析。符合正态分布的计量资料用均数±标准差表示,采用配对样本 *t* 检验分析方法;不符合正态分布的计量资料使用 M(Q1,Q3) 表示,采用秩和检验分析方法。*P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 血氧测试

静息状态下,物联网血氧检测仪的 SpO<sub>2</sub> 数据回传测试,使用 Clinical 公司高精度 XS-1 血氧饱和度模拟仪作为信号发生源,对监护系统采集数据的准确

性进行分析<sup>[20]</sup>。信号源分辨率为 1%,在 70%~100% 的信号区间精度为±0.5%。以 Covidien llc 5100C 医用仪器为对照组,对数据传输的实时性和稳定性进行验证。试验组、对照组仪器的分辨率均为 1%,经过 3 家不同附属医院分别进行 5 次测试后取平均值,结果保留两位小数。验证发现数据不符合正态分布,得到统计结果如表 1 所示。各组差异均无统计学意义(*P*>0.05)。试验结果表明,当信号源 SpO<sub>2</sub> 在 75%~100% 的区间时,试验组与对照组得到的回传数据绝对误差均小于 0.5%,在信号发生器的精度范围内。物联网血氧检测仪可能因自身形态的影响,准确性稍低于 Covidien llc 5100C,但符合预期。系统数据传输受到的网络波动影响小,总体符合预期。当 SpO<sub>2</sub> 持续低于设定的阈值(90%)超过 30 s 时,均能发出报警提醒。

运动状态下,物联网血氧检测仪的 SpO<sub>2</sub> 数据回传测试,由 5 名志愿者真实运动场景的测量数据统计得到。对照组选用获得二类医疗器械认证的华为 Watch GT2 Pro ECG 版本,支持 24 h 的 SpO<sub>2</sub> 监测。为保证测试环境的公平性,5 名志愿者同时佩戴两种测试仪器,分别在跑步机上完成 3 min 的匀速慢走(5 km/h)、快走(7 km/h)、慢跑(9 km/h)、快跑(11 km/h) 试验,记录当次试验的连续 SpO<sub>2</sub> 数据。每人在每个运动速度下均进行 5 次试验,取 3 min 匀速运动中间 1 min 的 SpO<sub>2</sub> 数据记录的平均值。每运动场景下,试验组、对照组分别得到 25 个记录值。试验组、对照组仪器的分辨率均为 1%,验证发现数据符合正态分布,得到的统计结果如表 2 所示。每个运动场景下,试验组和对照组差异均有统计学意义(*P*<0.05)。试验结果表明,运动状态下系统得到的回传 SpO<sub>2</sub> 数据精度、波动情况总体上与华为 Watch GT2 Pro ECG 相当,差别在预期内。

2.2 体温测试

物联网血氧检测仪还具有体温检测功能,使用 MS450 多参模拟仪预设 3 组不同温度(精度±0.1℃) 作为体温信号源,选用二类医疗器械 Braun BNT400 型红外额温计作为对照组。在室温为范围为 20.4~21.8℃ 的试验环境下,分别每隔 2 min 连续 5 次测量。验证发现数据符合正态分布,统计结果如表 3 所示。信号温度为 37℃ 时,试验组和对照组差异有统计学意义(*P*<0.05),其余两组无统计学意义(*P*>0.05)。试验测试结果表明,在信号温度最接近人体真实温度的 37℃ 和 40℃ 情况下,试验组和对照组测量值的绝对误差均小于 0.1℃,在多参模拟仪的精度范围内,测量结果较为精准。

表1 静息状态下SpO<sub>2</sub>测试  
Table 1 SpO<sub>2</sub> detection test in resting state

信号源 SpO <sub>2</sub> /%	组别	回传 SpO <sub>2</sub> /%	远程报警激活	Z 值	P 值
75	试验组	75.08(74.04, 75.44)	TRUE	1.023	0.306
	对照组	74.61(74.05, 75.39)	TRUE		
80	试验组	79.84(79.40, 80.22)	TRUE	0.511	0.609
	对照组	79.58(79.16, 80.22)	TRUE		
85	试验组	84.83(84.09, 85.19)	TRUE	0.795	0.427
	对照组	84.93(83.96, 85.56)	TRUE		
90	试验组	89.68(89.23, 90.18)	FALSE	0.511	0.609
	对照组	90.17(89.67, 90.52)	FALSE		
95	试验组	95.37(94.27, 95.77)	FALSE	0.227	0.820
	对照组	94.96(94.36, 95.46)	FALSE		
100	试验组	100.00(100.00, 100.00)	FALSE	0.000	1.000
	对照组	100.00(100.00, 100.00)	FALSE		

表2 运动状态下SpO<sub>2</sub>测试  
Table 2 SpO<sub>2</sub> detection test in motion states

运动场景	组别	SpO <sub>2</sub> /%	t 值	P 值
慢走(5 km/h)	试验组	96.97±1.42	-2.161	0.041
	对照组	97.76±0.98		
快走(7 km/h)	试验组	95.89±0.95	-3.270	0.003
	对照组	96.93±1.16		
慢跑(9 km/h)	试验组	96.35±1.27	-3.037	0.006
	对照组	97.23±1.05		
快跑(11 km/h)	试验组	96.08±1.41	-2.302	0.030
	对照组	96.95±1.02		

表3 体温检测测试  
Table 3 Body temperature detection test

信号温度/℃	组别	体温/℃	t 值	P 值
37	试验组	37.06±0.05	3.162	0.034
	对照组	36.96±0.09		
40	试验组	40.06±0.13	0.784	0.477
	对照组	40.02±0.04		

2.3 通讯测试

试验测试系统的数据收发时延和丢包情况,分别在上午 10:00、中午 13:00、下午 16:00 和晚上 20:00 进行测试,以 100 条/s 的速度连续发送 5 min 模拟数据,经 Apache Flume 报文解析、Apache ActiveMQ 信息分发、Spark SQL 中实现数据的云平

台数据库结构化存储<sup>[21]</sup>。分别记录发送端每条数据的时间戳和云平台存储数据的时间戳,验证云平台存储数据为 30 000 条,与发送量一致,无丢包现象。数据的平均时间戳差值,则为数据收发时延,约为 1.9 s。测试结果说明系统的数据通讯稳定、快速,具有良好的性能。

3 讨论和结论

本研究验证了基于 NB-IoT 的耳机式血氧监护系统的设计可行性和功能完备性,利用广州医科大学本部和附属医院内的资源,基本构建和实现“云-边-端”协同的医疗物联网架构,并进行系统血氧、体温监测数据的回传试验。结果表明,在该架构下,基于 NB-IoT 的耳机式血氧监护系统可以完成生理参数的用户“端”数据采集、“边”缘低时延传输和解析分发,以及“云”上存储和分析处理<sup>[22-23]</sup>。数据监测的精确性、网络传输的稳定性都有良好表现。本研究具有的创新性主要体现在:(1)设计使用入耳式耳机外形,血氧和体温检测功能分布在两侧的耳孔,佩戴简单,无需精确定位,可低成本实现血氧、体温的一体化快速检测,更适应基层快速检测或用户居家监测的场景;(2)NB-IoT 网络保证了海量用户端设备的低时延接入,在满足穿戴检测设备超低功耗的同时,为系统提供电信级安全可靠的数据通信;(3)云平台数据累积到一定规模后,可以向用户提供个性化的追踪记录,同时云端使用 Spark Mlib 进行机器学习,以及通过 Spark GraphX 实现图计算和图挖掘,能开发更多人工智能主动分析、预警等功能。本研

究还存在以下不足:(1)设计的物联网血氧检测仪,在运动状态下的 $\text{SpO}_2$ 检测数据稳定性欠佳,后期需提升嵌入式软件算法与云平台机器学习算法相互融合的改进策略;(2)物联网医疗设备尚未形成统一的交互标准,数据的安全性存在隐患,且本系统接入新设备扩展功能后往往需要修改一系列的配置,操作麻烦<sup>[24-25]</sup>。

综上所述,蜂窝物联网的特性,结合“新基建”的红利,为移动医疗监护系统的功能实现提供的良好保障。本设计基于物联网和可穿戴技术,为后疫情时代构建更加稳固高效的公共卫生防疫体系提供可借鉴的思路。

## 【参考文献】

- [1] 王晓峰,刘华伟.积极应对人口老龄化的中国模式[J].人口学刊,2023,45(1): 11-15.  
Wang XF, Liu HW. Actively coping with population aging of Chinese model[J]. Population Journal, 2023, 45(1): 11-15.
- [2] Bashshur R, Doarn CR, Frenk JM, et al. Telemedicine and the COVID-19 pandemic, lessons for the future[J]. Telemed J E Health, 2020, 26(5): 571-573.
- [3] Ghomid K, Ar-Reyouchi D, Rattal S, et al. Protocol wireless medical sensor networks in IoT for the efficiency of healthcare[J]. IEEE Internet Things J, 2021, 9(13): 10693-10704.
- [4] Ahad A, Tahir M, Yau KL. 5G-based smart healthcare network: architecture, taxonomy, challenges and future research directions[J]. IEEE Access, 2019, 7: 100747-100762.
- [5] Subahi AF. Edge-based IoT medical record system: requirements, recommendations and conceptual design[J]. IEEE Access, 2019, 7: 94150-94159.
- [6] Li J, Cai J, Khan F, et al. A secured framework for SDN-based edge computing in IoT-enabled healthcare system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 135479-135490.
- [7] Buyanov D, Zabodaev S. Continuous cerebral and tissue oximetry by three-wave NIRS device[C]//2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus). IEEE, 2020: 2469-2472.
- [8] 原静,赵跃进,孔令琴,等.血液成分变化对皮肤漫反射光谱及肤色的仿真分析[J].光学学报,2022,42(8): 216-226.  
Yuan J, Zhao YJ, Kong LQ, et al. Simulation analysis of skin diffuse reflectance spectroscopy and skin color with blood component change[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 216-226.
- [9] 康旭,张洋,任慧明,等.基于空间频域成像的人体皮肤组织光学和生理参数的提取[J].中国激光,2022,49(5): 194-203.  
Kang X, Zhang Y, Ren HM, et al. An approach for extracting optical and physiological parameters of human skin tissue based on spatial frequency domain imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(5): 194-203.
- [10] Gosink LJ, McNeil S, Brandi-Lozano JM, et al. Wearable health monitoring device[R]. Pacific Northwest National Lab, 2022.
- [11] Kuzubasoglu BA, Sayar E, Cochrane C, et al. Wearable temperature sensor for human body temperature detection[J]. J Mater Sci: Mater Electron, 2021, 32(4): 4784-4797.
- [12] Dosinas A, Lukocius R, Vaitkunas M, et al. Sensors and signal processing methods for a wearable physiological parameters monitoring system[J]. Elektron Elektrotech, 2017, 23(5): 74-81.
- [13] Xue J, Huang Y, Du X, et al. Design of a wearable device for monitoring  $\text{SpO}_2$  continuously[C]//2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom). IEEE, 2015: 1253-1257.
- [14] Chen X, Wang X, Shen H. Design of greenhouse environment monitoring system based on NB-IoT and edge computing[C]//2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, 2021: 1319-1324.
- [15] Berwal D, Vandana CR, Dewan S, et al. Motion artifact removal in ambulatory ECG signal for heart rate variability analysis[J]. IEEE Sens J, 2019, 19(24): 12432-12442.
- [16] Prawiro EA, Chou NK, Lee MW, et al. A wearable system that detects posture and heart rate: designing an integrated device with multiparameter measurements for better health care[J]. IEEE Consum Electr M, 2019, 8(2): 78-83.
- [17] 郭宇,张传洋,于文倩,等.元宇宙视域下数智化医疗信息应用服务模式研究[J].现代情报,2022,42(12): 117-126.  
Guo Y, Zhang CY, Yu WQ, et al. Research on application and service mode of digital intelligent medical information from the perspective of metaverse[J]. Journal of Modern Information, 2022, 42(12): 117-126.
- [18] 傅琪,毛琛.健康医疗大数据驱动下的流行病学研究:机遇与挑战[J].中华疾病控制杂志,2023,27(2): 125-126.  
Fu Q, Mao C. Epidemiological researches driven by big data in healthcare: opportunities and challenges[J]. Chinese Journal of Disease Control and Prevention, 2023, 27(2): 125-126.
- [19] 刘晓晨,王卓昊.基于大数据环境的科技管理数据集成平台研究[J].情报学报,2021,40(9): 953-961.  
Liu XC, Wang ZH. Research on science and technology management data integration platform based on big data environment[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2021, 40(9): 953-961.
- [20] 吴思圻,杨世金,胡志雄,等.生命体征模拟仪计量校准方法的研究[J].计量学报,2020,41(12): 1583-1589.  
Wu SQ, Yang SJ, Hu ZX, et al. Research on calibration method of vital sign simulator[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(12): 1583-1589.
- [21] 吴信东,嵇圣础. MapReduce 与 Spark 用于大数据分析之比较[J].软件学报,2018,29(6): 1770-1791.  
Wu XD, Ji SW. Comparative study on MapReduce and Spark for big data analytics[J]. Journal of Software, 2018, 29(6): 1770-1791.
- [22] 范勇,梁洪,孙继鹏,等.基于云边端架构的急救医疗设备物联网设计与实现[J].生物医学工程学杂志,2023,40(1): 103-109.  
Fan Y, Liang H, Sun JP, et al. Design and implementation of internet of things for emergency medical devices based on cloud-edge-device architecture[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2023, 40(1): 103-109.
- [23] 白文华,王成,张乐.物联网技术在可移动医疗设备管理中的探索及应用[J].中国医院管理,2023,43(2): 72-74.  
Bai WH, Wang C, Zhang L. Exploration and application of internet of things technology in the management of removable medical devices[J]. Chinese Hospital Management, 2023, 43(2): 72-74.
- [24] 赵景欣,岳星辉,冯崇朋,等.基于通用数据保护条例的数据隐私安全综述[J].计算机研究与发展,2022,59(10): 2130-2163.  
Zhao JX, Yue XH, Feng CP, et al. Survey of data privacy security based on general data protection regulation[J]. Journal of Computer Research and Development, 2022, 59(10): 2130-2163.
- [25] 刘奇旭,靳泽,陈灿华,等.物联网访问控制安全性综述[J].计算机研究与发展,2022,59(10): 2190-2211.  
Liu QX, Jin Z, Chen CH, et al. Survey on internet of things access control security[J]. Journal of Computer Research and Development, 2022, 59(10): 2190-2211.

(编辑:陈丽霞)