

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.04.011

反溺水智能穿戴设备的研究进展

杨瑞梁^{1,2}, 刘重言^{1,2}

(1. 天津工业大学 航空航天学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 纺织未来技术研究中心, 天津 300387)

摘要: 针对联合国和我国政府对溺水问题的高度重视, 从溺水监测方式、溺水报警方式、溺水救助方式等3个角度全面概述了反溺水智能穿戴设备的研究进展, 为反溺水研究提供了必要的基础资料, 并比较了不同穿戴位置对救助效果的影响, 分析了反溺水智能穿戴设备和基于算法的溺水监测系统的不同。总结得出: 采用以心率传感器为主的多类别传感器组合其监测效果最准确; 根据不同使用场景选用对应的通信方式能够最大化救援效果; 将手动气囊集成到自动气囊设备中, 可在溺水救援中提供最好的灵活性。本文为反溺水智能穿戴设备的下一代研发及政策制定提供了思路和方向。

关键词: 反溺水智能穿戴设备; 溺水监测; 溺水报警; 溺水救助

中图分类号: TP212.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)04-0083-12

Research advances in anti-drowning smart wearable devices

YANG Ruiliang^{1,2}, LIU Zhongyan^{1,2}

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Research Center for Future Textile Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In response to the significant attention paid to drowning incidents by the United Nations and the Chinese government, the research advancements in anti-drowning smart wearable devices were comprehensively reviewed from three key aspects: drowning detection methods, drowning alert methods, and drowning rescue methods. The effect of different wearing positions on rescue effectiveness was analyzed, and the differences between anti-drowning smart wearable devices and algorithm-driven drowning detection systems were examined. The results show that the combination of multiple types of sensors and primarily heart rate sensors can achieve the highest monitoring accuracy. Selecting appropriate communication methods based on specific scenarios can optimize rescue effectiveness. Integrating manual and automatic airbag mechanisms can provide optimal flexibility during drowning rescue. The study offers insights and guidance for the next-generation development of anti-drowning smart wearable devices and policy-making.

Key words: anti-drowning smart wearable devices; drowning detection; drowning alert; drowning rescue

溺水已成为全球主要的公共卫生问题, 是意外伤害死亡的第三大原因, 占有伤害相关死亡的7%。世界每年约有23万人^[1], 我国每年约5.9万人死于溺水, 其中未成年人占比95%以上, 且未成年人因溺水而亡的比例逐年上升, 受到社会强烈关注^[2]。鉴于溺水的严重性, 联合国大会在2021年首次通过关于全球溺水的决议^[3], 并在2023年再次重申^[4], 把7月25日定为世界预防溺水日, 呼吁并促进防溺水设备的研发和推广。我国每年春夏之交均在中小學生中开展防溺水安

全知识宣讲等活动, 推广防溺水设备和方法^[2]。

反溺水智能穿戴设备通过集成先进的传感器和通信系统, 能够实时监测佩戴者的生理状况以及周边环境变化, 并在溺水发生初期发出警报, 从而为及时救援提供帮助^[5], 有的反溺水智能穿戴设备甚至可以直接对溺水者进行救援^[6]。由于具有便于携带、报警迅速等优点, 反溺水智能穿戴设备受到研究学者和市场的高度认可, 其所采用的溺水监测方式、溺水报警方式、溺水救助方式不同, 在溺水救援中效果各异。

收稿日期: 2025-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1933111)

通信作者: 杨瑞梁(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为航空救生。E-mail: yangruiliang@tiangong.edu.cn

本文旨在评估现有文献中典型反溺水智能穿戴设备的反溺水救援原理,重点探讨不同溺水监测方式、溺水报警方式、溺水救助方式在溺水预防中的有效性,以期为反溺水智能穿戴设备的进一步开发和大规模应用提供理论依据和实践指导,推动该领域的技术进步和实际应用。

1 溺水监测

现如今的溺水监测主要分为 2 类:基于传感器和基于图像处理系统^[7]。Shehata 等^[8]通过评估 2 种系统的准确度、复杂性和成本,比较了不同的溺水监测方法。就成本与复杂性而言,基于传感器的设备属于低至中等复杂度类别,而图像处理系统则被认为是复杂且昂贵的。图像处理系统准确度高,Zhang 等^[9]使用背景减除以降低水质浑浊的影响之后测试的 16 段溺水视频的准确率为 100%。但随着水质浑浊度、光照强度以及拥挤程度的提高,识别的准确度会大大降低。Salehi 等^[10]利用 HSV 色彩空间算法跟踪游泳者水下停留时间,正常情况下准确率达到 95%,但在强光环境下误检率上升 30%,大大降低图像系统的准确度。相比图像处理系统,基于传感器的反溺水智能穿戴设备优势在于其无创性^[11],受环境影响小,可防止游泳者感到不适,同时提高他们在活动期间的安全性,但游泳动作或水体导电性会对监测准确率造成影响。Hemalatha 等^[12]设计了压力传感器腕带,在 1.5 m 深的游泳池模拟溺水,对于单目标检测准确率可以达到 92%,但实验过程中一些潜水动作会导致设备误报。总体来看,基于传感器监测的反溺水智能穿戴设备受环境因素影响小^[13]、方便穿戴^[14]、简单有效且费用低廉,因此得到了更多关注。

通常情况下,溺水过程持续 3~4 min,其特征是水不可避免地进入口腔引发剧烈咳嗽、角膜反射消失、血容量增加、血氧饱和度逐渐降低以及电解质发生改变^[15]。当前有关反溺水智能穿戴设备的研究中,通常采用可监测这些特征的传感器组合进行监测,Wu 等^[16]利用腕带的加速度传感器模块记录手臂运动来监测溺水事故,利用水压传感器判断水深,如果溺水情况发生,设备会通过 LED 灯光警示救生员。Nguyen 等^[17]提出了基于物联网(IoT)技术应用的救生衣,设计了一款利用心率传感器和水传感器监测溺水的救生衣,救生衣还配备了紧急消息传递功能,发生溺水时,会自动发送救援消息。Deng 等^[18]提出了一种面向儿童的基于传感器的自救警报系统,集合心率传感器、压力传感

器、浸水时间传感器实现多级报警机制,单一参数异常时通过手机 APP 通知家长,当多参数异常时,系统会触发自救装置。

为便于介绍,本文对传感器的功能类型进行区分,将传感器区分为基于穿戴者生理情况监测的传感器、基于传感器周围环境监测的传感器、基于穿戴者运动模式监测的传感器。

1.1 基于穿戴者生理情况监测的传感器

溺水的几种常见迹象中只有少数是可测量的生理参数,且每个溺水场景中都会出现^[19]。其中,心率和血氧水平是评估濒临溺水受害者最主要的 2 个生理参数^[20],呼吸频率也是较为常用的评估濒临溺水的生理参数。对这些生理参数进行监测的常见传感器如图 1 所示。

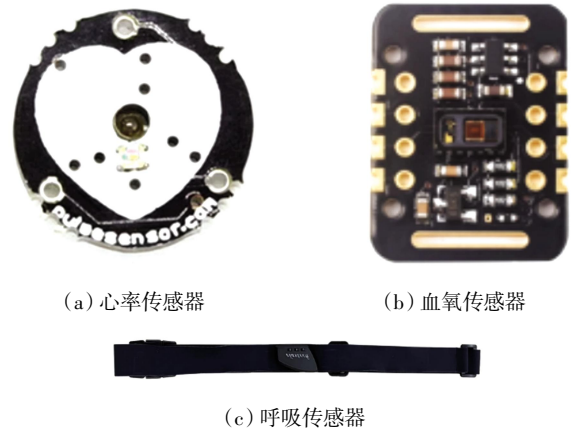


图 1 监测穿戴者生理情况的传感器

Fig.1 Sensors for monitoring physiological condition of wearer

1.1.1 心率监测

在以上 3 个常用于反溺水智能穿戴设备溺水监测的生理参数中,心率的应用最为广泛,常见的心率传感器如图 1(a)所示。早在 1938 年,Banting 等^[21]研究发现,不同类别的溺水者心率(HR)模式具有一致性,无论是哪一种溺水类型,溺水者在濒死前的心率都会显著降低。Lund 等^[22]在此基础上通过多个案例研究发现:个体在入水数分钟后,心率会降至 43 次/min (43 bpm),并在 35~78 bpm 的稳定区间内波动。这为心率传感器判断溺水者是否溺水提供了理论依据。心率传感器凭借其便利性,比较容易集成在防溺水智能穿戴设备中,通过监测心率变化,能够及时了解佩戴者是否处于溺水状态。孙海涛等^[15]和黄家莹等^[23]通过比较提前设定好的佩戴者正常心率范围和实时心率,从而判断佩戴者是否处于危险状态。该方式充分考量了不同个体间心率波动范围的固有差异,有效规避了因

这种差异对诸如儿童、老年人等特定群体可能产生不同监测效果的潜在风险。

相较于直接监测游泳者的心率变化,心率变异性(HRV)能够敏感地捕捉到应激状态下的生理变化。Ganesamoorthy等^[24]使用RMSSD(相邻RR间期差值的均方根)作为HRV的主要时域分析指标。若RMSSD骤降,触发系统启动蜂鸣器报警。HRV产生于自主神经系统对心脏窦房结的调节,因而它可以间接反映心脏自主神经系统的平衡^[25],从而帮助判断游泳者是否处于溺水状态,例如心率过快或过慢、心律不齐等。

1.1.2 血氧饱和度监测

血氧饱和度是人体血液中氧合血红蛋白占全部可结合血红蛋白的比例,它与人的呼吸活动息息相关,是描述人体呼吸循环系统正常与否的重要生理参数^[26]。血氧饱和度的测量分为透射式和反射式2种。

透射式血氧监测方案是光束由传感器自皮肤一端射入,并自另一端射出,由传感器接收并分析入射光与透射光的变化以此计算血氧饱和度。而反射式中的发射、接收传感器都在人体被监测部位的同一面,接收所测部位反射回来的光,监测光的强度变化,进而计算血氧饱和度^[27]。由于透射式监测方式的应用范围较窄,多为指夹式或耳夹式,容易受到运动的干扰,因此并不适用于反溺水智能穿戴设备,在实际研究中,多采用反射式血氧监测器。脉搏血氧仪就是利用反射手段监测脉搏血氧饱和度的设备,如图1(b)所示。根据朗伯比尔定律^[28-29],对光电容积脉搏波进行处理,从而实现对人体脉搏和血氧饱和度参数的监测^[30]。Banarjee等^[31]在研究中直接使用脉搏血氧仪测量血氧饱和度,在游泳过程中传感器节点持续监测血氧浓度、所处水深和游泳位置。当血氧饱和度小于90%、水深大于60cm时,生成报警信号。血氧饱和度是判断溺水的重要依据。人体正常状况下的血氧饱和度应在90%~100%区间内,平原地区的人体血氧饱和度应在94%以上,当血氧饱和度低于90%时,会有患低氧血症的风险^[32]。上述研究是把测量得到的血氧饱和度与阈值相比较,来判断游泳者是否处于溺水状态。

1.1.3 呼吸监测

呼吸指机体与外界环境之间的气体交换过程,是维持机体新陈代谢和其他功能活动所必需的基本生理过程之一^[33]。成年人在平静状态下的呼吸频率大约为10~20次/min;儿童大约为20~30次/min^[34]。人体如果长时间出现低通气或无法呼吸现象,在呼吸频率小于最小值时,代表游泳者可能出现了溺水状态,会导致机体缺氧与二氧化碳分压偏高,进而对机体的神经

系统造成伤害。呼吸模式分腹式呼吸、胸式呼吸2种,均是由于肌体胸腹部发生收缩运动所产生的^[35]。吴梦^[36]利用压阻式压力传感器监测腹部压力变化捕捉儿童的呼吸信号,如图1(c)所示。若呼吸频率低于20次/min或者20s内未监测到呼吸信号,则立刻启动报警模块。王玉林^[37]提出了一种基于D型塑料光纤传感器的人体呼吸监测系统,设计了可穿戴式腰带结构的呼吸传感器,将呼吸腰带置于人体腹部,能够监测不同运动状态下的呼吸频率,进而判断佩戴者是否处于溺水模式。

1.2 基于穿戴者周围环境监测的传感器

图2所示为监测穿戴者周围环境的传感器。



(a) 水位传感器

(b) 水传感器

图2 监测穿戴者周围环境的传感器

Fig.2 Sensors for monitoring surrounding environment of wearer

1.2.1 水位传感器

Hunsucker等^[38]通过分析多起救援案例的历史数据得出结论:水深是反映溺水风险的一个关键参数,接近60%的救援发生在水深超过1.52m的区域。通过测量游泳者所处的水位深度,有利于判断游泳者是否处于危险中。当水位传感器感知到游泳者所处的深度超过预设阈值时,进行报警。在崔亚龙等^[39]的研究中,水位传感器根据水压变化引起内部内膜片产生形变压力,如图2(a),使敏感电气元件产生低电平信号,计算出佩戴者所处水深,再结合其他生理情况传感器综合判断人体是否处于异常状态,当心率异常或进入水中持续时间过长时,系统会触发报警。孙继鲁等^[40]通过水位传感器监测液位变化,并将信号发送给STM32单片机控制模块,控制模块同时接收生理参数监测传感器发送的血氧饱和度和心率数据。通过对传感器数据进行分析,判断为溺水状态则会启动救生设备,帮助溺水者脱困。

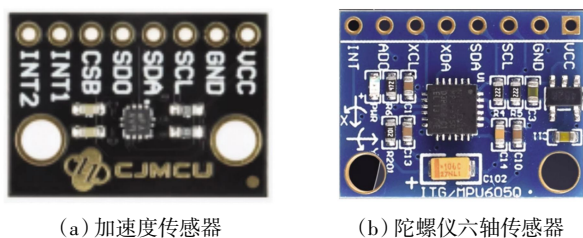
1.2.2 水传感器

水传感器相比于水位传感器更加偏向于溺水保护,能够快速监测穿戴者是否接触到水,从而能够及时地触发报警,如图2(b)所示。Sivakami等^[41]设计了一种反溺水智能穿戴设备,将水探测器放置在用户的挂坠中。当用户被海浪卷入水中时,水探测器被完全淹没。如果探测器持续被淹没超过设定时间,系统就会

触发警报。同时,系统使用 GPS 定位用户的位置,以便救援人员快速精确搜救。Roy 等^[42]采用电阻式水监测传感器,当传感器暴露在空气中时,由于空气的高电阻,电路保持开路状态;当传感器浸入水中时,水的导电性使电路闭合,从而触发监测信号,超过其预设的时间阈值时,系统会判定为溺水状态。

1.3 基于穿戴者运动模式监测的传感器

图 3 所示为监测穿戴者运动模式的传感器。



(a) 加速度传感器

(b) 陀螺仪六轴传感器

图 3 监测穿戴者运动模式的传感器

Fig.3 Sensors for monitoring movement patterns of wearer

1.3.1 加速度传感器

加速度传感器在反溺水智能设备中有着实时监测、低成本的优点。在溺水监测过程中,通过分析加速度计的数据,可以识别出游泳者是否处于溺水状态。Ganesamoorthy 等^[24]研发的反溺水智能穿戴设备使用加速度传感器来监测游泳者的运动状态,如图 3(a)所示。加速度传感器通过测量游泳者在 X、Y、Z 3 个轴上的加速度变化,结合利用心率传感器监测到的数据,来判断游泳者是否处于溺水状态。Palaniappan 等^[43]利用加速度传感器来监测游泳者的手臂运动,通过计算加速度的平均值和标准差,来判断游泳者是否处于溺水状态。Kharrat 等^[44]使用智能手机中的加速度传感器来监测游泳者的运动状态。通过计算加速度的平方根,系统可以判断游泳者是否处于运动或静止状态。当静止时间过长或运动状态异常时,触发救生装置。

1.3.2 陀螺仪

陀螺仪通常与加速度传感器、其他不同类型监测传感器结合使用,以提高溺水监测的准确性,如图 3(b)所示。陀螺仪通过传输角速度数据到控制器,基于处理器分析处理后得到所需要的导航数据^[45],因此在溺水救援中常常被用来分析佩戴者的姿态,能够有效识别溺水风险。李榆^[46]利用陀螺仪辅助识别不会游泳或昏迷的溺水者,首先采集佩戴者的运动轨迹,通过分析数据判断其身体是否平行于或垂直于泳池底,与其他传感器进行结合分析,能够快速识别溺水者。陀螺仪还常与加速度传感器一同监测。Alqahtani 等^[47]提出了一种基于智能手机框架的跌倒和溺水事件检测系统,通过智能手机内置的加速度计、陀螺仪等传感器

采集数据,利用逻辑模型树(LMT)、贝叶斯网络(BN)、逻辑回归(LR)等 3 种机器学习模型对跌倒、溺水及日常活动进行分类。其中,LMT 表现最优,分类准确率达到 98%。Barkunan 等^[48]提出了一种新的环境辅助框架跌倒与溺水检测(falling and drowning detection, FADD),旨在识别和区分跌落和溺水的事件。通过智能手机内置加速度计和陀螺仪获取数据,对人体的运动进行有效识别,采用 LMT 对溺水进行监测,识别准确率为 93%。

除此以外,Zhang 等^[49]提出了一种智能自供电救生衣系统,集成了 6 种摩擦电纤维传感器来代替传统惯性测量单元,利用运动产生的机械能自发电,通过卷积神经网络(CNN)对运动信号进行实时分析,识别穿戴者的状态。

2 溺水报警

2.1 基于短距离与局域网通信技术报警

2.1.1 蓝牙通信

反溺水智能穿戴设备一旦监测到穿戴者落水,就需要通过溺水报警方式将溺水信息传递出去。蓝牙通信是最常用的溺水报警方式之一。作为一种低功耗、短距离的无线通信技术,这一方式确保了反溺水智能穿戴设备的长时间工作能力,Danh 等^[50]利用蓝牙信号难以穿透水下会导致连接中断的特性来判断是否溺水,在实验过程中游泳者佩戴的可穿戴标签会定期向扫描器发送信标信号,并采用改进的基于接收信号强度指示(RSSI)的算法进行位置估算。当遇险者在水下滞留超过设定时长时,蓝牙标签与扫描器之间的无线链路将中断,随即触发监控区域内的警报装置向救生员示警。鄢晓曦等^[51]利用蓝牙通信短距离的特性,通过设立阈值,建立了安全围栏,判断游泳者是否离开了安全围栏并且报警。Zhu 等^[52]将超疏水导电织物与蓝牙信号传输和接收系统集成,将传感器的信号通过蓝牙传输到手机上,能够实时监测游泳者的状态。Zhang 等^[53]开发了一种基于蓝牙技术的超疏水碳纳米管传感器系统,利用多传感器组合采集游泳数据,并通过蓝牙传输到手机客户端进行显示和分析,可实时监测游泳者状态并通过手机 APP 触发溺水警报。Johnson 等^[54]通过蓝牙技术实现设备之间的通信。游泳者佩戴的头带与系统中心之间通过蓝牙信号进行连接。当头带被水淹没时,蓝牙信号会中断,触发系统警报。

2.1.2 Zigbee 通信

与蓝牙不同,Zigbee 协议专为低功耗、长时间运行

和大规模设备连接而设计,能够提供更为稳定的网络连接和更长的电池续航时间,尤其适用于需要多个设备协同工作的环境。在溺水报警领域,Zigbee 通信的优势在于其低功耗、高扩展性和强大的网络自愈能力,使得它成为更适合大规模部署和长期运行的无线通信技术。黄家莹等^[23]使用 Zigbee 无线实时定位模块、心率监测模块和 LED 发光报警模块,确保游泳者溺水时能够及时报警,上位机通过 Zigbee 无线定位系统获取游泳者的位置信息,帮助救援人员快速找到溺水者。邹旭等^[55]采用泳帽中的压力传感器进行监测,当超过设定水压且持续时间超过设定值时,Zigbee 通信装置发送信号,LED 灯发光,实现判断溺水及报警的功能。Hariharan 等^[56]利用 ZigBee 无线通信模块实现下位机(穿戴设备)与上位机(监控中心)的数据交互,采用 Zigbee 协调器作为网络中心节点,接收所有下位机数据。在接收 Zigbee 数据后,解析并存储至数据库,在监测到溺水时,系统自动定位并触发泳池广播警报。

2.1.3 Wi-Fi 通信

Wi-Fi 是一种常见的无线通信技术,它通常用于提供高速的数据传输,特别适用于在覆盖区域内需要较高带宽的溺水报警场景。Kabir 等^[57]通过 Wi-Fi 通信将反溺水智能穿戴设备收集的数据传输到云端,实现数据存储、分析和处理,为早期溺水监测提供可靠的数据支持。但是 Wi-Fi 的网络连接不稳定、功耗大,需要在充电设备完善的地方使用,这在一定程度上限制了 Wi-Fi 的使用场景。

为了更清晰地比较溺水报警中所使用的的不同短距离与局域网通信技术,本文从传输距离、传输速率等关键性能指标对其进行量化对比^[58-61],如表 1 所示。

表 1 短距离通信技术对比

Tab.1 Comparison of short-range communication technologies

技术	传输距离/m	典型功耗	传输速率/(kb·s ⁻¹)	主要优势
蓝牙	10	较低	1 000	低功耗、快速配对和移动终端直连
Wi-Fi	100	高	11 000	高带宽长距离覆盖,移动终端直连
Zigbee	10~75	超低	250	低功耗持久监测、强抗干扰稳定传输

2.2 基于广域与应急通信技术报警

2.2.1 北斗通信

我国北斗导航系统采用的是最新三频信号方案,其频率经过国际组织认可^[62]。北斗卫星短报文通信技术借助若干人造卫星,对北斗用户进行实时监测,从而掌握北斗用户当前位置。北斗用户可通过改变终端发出的波段频率与北斗卫星进行实时通信^[63]。薛文峰

等^[64]研制了基于北斗通信的小型低功耗智能报警终端,通过一款简易安装式的卡口结构实现智能报警终端在传统救生衣上的稳固安装,利用智能报警终端实时显示落水人员的精准定位与时间。吴忻舟等^[65]设计了一款具有防走失和溺水救生功能的孤独症儿童智能服装,通过北斗定位模块在儿童溺水或走失时起到定位作用。

2.2.2 GPRS 通信

通用分组无线服务(GPRS)通信方式在溺水报警中也时有应用。GPRS 是基于蜂窝网络的技术,其覆盖范围非常广泛,通常可以覆盖全球范围,适合远程通信。孙永泉^[66]所研制的救生装置通过 GPRS 将数据发送到上位机服务器进行数据处理、定位和预警,研究表明浴场非常适合采用 GPRS 通信。崔亚龙等^[39]让救生手环通过 GPRS 将数据发送到手机端 APP,实现远程控制和预警。但是,GPRS 信号在水下的覆盖范围有限,需要进行特殊的信号增强措施。如果能让 GPRS 在未来的溺水救援方面起到更大的作用,需要进一步研究和改进 GPRS 技术,使其能够更好地服务于水上安全领域。

2.2.3 AIS 通信

船舶自动识别系统(AIS)是一种基于 VHF(甚高频)无线电通信的自动识别系统,在溺水救援领域,能够用来监控、追踪智能穿戴设备,Wen 等^[67]将 AIS 集成到 Life Tag 设备中,帮助在海上事故中快速定位和救援溺水者,当设备落入水中时,设备会自动触发并通过 AIS 频道广播求救信息。李培正等^[68]提出将具有 AIS 定位和发射功能的装置内置在救生衣中,构成可定位报警的智能化自触发式救生衣,遇险人员落水后自动触发报警信号,传送遇险人员位置等相关信息。

本文从传输距离、典型功耗等关键性能指标对用于溺水报警的不同广域与应急通信技术进行量化对比^[69-72],如表 2 所示。

表 2 广域通信技术对比

Tab.2 Comparison of wide-area communication technologies

技术	传输距离	典型功耗	传输速率/(kb·s ⁻¹)	主要优势
北斗	全球	高	0.4	全球覆盖,可独立导航
AIS	10~40 海里	低	9.6	低功耗,海上覆盖广
GPRS	依靠基站	较高	114	依赖现有通信网络,易用性高

注:1 海里=1.852 km。

2.3 呼救与主动定位技术

部分防溺水穿戴设备通常利用蜂鸣器或灯光呼

救,能够实现主动定位及远程呼救。这一类设备的核心优势在于其主动性,能够在溺水的第一时间向外界进行呼救行为。但与其他类型的救援方式相比,这一救援方式非常需要外界辅助,这在一定程度上限制了此类反溺水穿戴设备的应用场景,通常用来防止意外跌落。Samuel 等^[73]提出了一种基于心率的压力传感器防溺水系统:发送模块采用腕带设计的方式,包括一个微控制器和一个心率传感器,预定义最高和最低的心率数阈值,跟踪到超过阈值的异常心率会向接收模块发送警报;接收模块由单片机、液晶屏、蜂鸣器组成;射频模块用于无线传输和信号接收。Zhou 等^[74]在救生衣内部嵌入水传感器用来监测是否接触到水,内置有北斗定位系统能够迅速获取用户的位置,救援平台接收到求救信息后,会将求救者的位置信息发送到救援人员的手机 APP 上,并且设备会发出高强度闪光灯警报以及声音警报,提醒周围人员;语音模块会自动播放自救指令,引导穿戴者进行自救。邓烈威^[75]提出了一种依靠声光报警机制的游泳池预警系统,一旦游泳者出现溺水事故时可以通过佩戴在身上的水下声信标发射声信号,水上信号处理机采集并实时处理接收到的信号,采用一定的判决机制判决游泳者是否溺水,并给出溺水者的位置坐标,发出声光报警,通知救援。

3 溺水救援

反溺水智能穿戴设备的溺水救援方式主要分为手动打开气囊和自动开启气囊,如图 4 所示。



图 4 基于气囊触发的应急浮力救援

Fig.4 Emergency buoyancy rescue system based on airbag triggering

手动打开气囊的救援方式设备简易、操作简单、可控性强。使用者在预感到危险时,通过手动操作气囊控制开关,释放救生气囊。但是,手动打开气囊在紧急情况下可能会存在反应迟缓的问题,特别是当使用者因惊慌失措或体力不支无法及时触发气囊时,可能会错失最佳救援时机。相比于自动气囊,手动气囊成

熟度高,不再是一个复杂的技术问题,市面上已有部分产品安装了手动气囊,如图 4(a)所示,因此本节不再赘述。

自动开启气囊有着实时响应、无需人工干预的优势,能够提高救援效率。设备通过多传感器监测佩戴者的生理状况,能够在溺水初期就自动触发气囊启动,如图 4(b)所示,防止溺水事故进一步恶化。Sindhujja 等^[76]提出了一种用于水下游泳者的自调节气囊框架,配有加速度计和压力传感器。当压力传感器感知到游泳者的压力迅速增加,或者测量到的加速度计数据表明他在水下长时间保持静止,设备会自行触发安全气囊,用来避免游泳者溺水。Kharrat 等^[77]提出了一种自动安全气囊系统,根据压力传感器和加速度计监测数据,通过智能手机应用程序进行比较,准确定义游泳者的头部是否在水下的位置及水下静止时间。如果超出安全范围,则触发设备警告,并释放安全气囊。但是自动触发气囊也存在一些缺点,例如缺乏灵活的个体调节选项,这可能会造成一些使用者的困扰。有研究将手动开启气囊与自动开启气囊相结合。崔亚龙等^[78]通过手环内置心率传感器监测佩戴者心率变化,如果出现异常,系统会自动启动气囊,也可以在佩戴者意识到危险时,手动打开气囊。孙继鲁等^[79]所研制的溺水识别装置采集佩戴者的血氧和心率数据以及水压大小,若超出预设状态,判断为溺水,自动触发充气装置释放气囊,也可以拔掉保险销直接接触充气装置,监护人也可以通过遥控设备远程触发充气装置提供及时的救援。

自动充气救生设备在特定环境(如剧烈运动或水溅)下可能发生误触发^[11,77],但由于不同产品和触发机制的设计差异,目前尚无统一的误触发率标准。同时,市面上常采用液态二氧化碳进行充气操作,二氧化碳等气体在低温下的膨胀能力会降低,从而影响设备的充气速度和完整性,但具体影响程度仍需进一步实验研究。

4 比较分析

4.1 反溺水智能穿戴设备在身体不同位置的差异

相比于其他位置,将设备布置在手腕处具有灵活度高、复杂度低、成本低的优势,因此,目前反溺水智能穿戴设备大多布置在手腕。但是布置在手腕相比于其他位置也会有一些劣势。Ramani 等^[77]研究发现,将设备放置在人体手腕处,产生突然的身体运动时,例如猛烈挥动手臂,微控制器接收到加速度计的信号

后,会触发充气装置。如果在高强度游泳过程中导致气囊意外打开,可能会对使用者的身体健康甚至生命安全造成损害。全刘辉等^[78]研究设计了一款基于心率监测溺水并通过 Zigbee 无线网络实现自动报警和定位的智能手环,但该款手环仅仅可以自动报警,缺少自救功能,主动报警时要求游泳者保证手环露出水面,这对于溺水者来说是一项很艰难的任务,而缺少自救功能会影响受害者的生还时间。张晶^[79]将微控制器、压缩气囊以及执行器集成到一个手环中,但未考虑电池续航问题,对于长时间佩戴或在水下使用,续航能力是影响设备表现的关键因素。因此,在设计手腕处设备时,需要考虑设备的稳定性和适用性,以确保其在实际应用中的可靠性。

布置在头部的反溺水智能穿戴设备大多借助泳帽或者头箍作为载体。相比于手部救生设备,受人体摆动幅度影响最小。维珊等^[80]利用头箍作为载体,内置水位电极传感器监测游泳者在水中的状态,确认是否处于溺水状态,并及时报警。但头箍并非传统的泳帽,可能影响穿戴者的体验感。

放置在胸部的反溺水智能穿戴设备常与救生衣结合,这一位置不仅能够确保气囊在溺水发生时能够迅速为使用者提供浮力支持,还能够第一时间减少颈部或头部的压力,提升穿戴者的舒适性和安全性。Nguyen 等^[81]利用救生衣上的传感器和无线网络连接,实时监测佩戴者的位置和状况。当监测到溺水或身体状况不佳时,自动发送求救信息至救援站和救生员。

腰部配带的设备则具有更好的稳定性和更快的部署速度,尤其是在救生应用中。腰部位置相比于其他位置相对固定,不易脱落,并且不会影响游泳者的正常动作。Kharrat 等^[82]介绍了一种自动腰带气囊溺水预防系统,结合了腰部气囊和智能手机的压力传感器、加速度计,能够有效监测游泳者的状态,并在发生溺水风险时及时采取行动。

与胸腔、头部等区域的气囊设备不同,位于脚部的反溺水智能穿戴设备通常设计得更为紧凑,不会对使用者的上半身造成任何束缚或不适。Sindhuj 等^[76]设计了一款脚踝佩戴的智能设备,该设备通过监测游泳者的心率、血氧饱和度、体温和呼吸等生命体征,并结合加速度计数据,实现了对溺水情况的早期识别和报警。

4.2 与基于算法的溺水监测系统的差异

反溺水设备主要分为2类:反溺水智能穿戴设备和基于算法的溺水监测系统。前者穿戴在泳者身上,并采用多种传感器如水压、血氧、心率或水深等传感器

监测是否溺水;后者通过安装在泳池边或无人机上的摄像头,获取现场图像并应用多种算法来识别溺水^[82]。

基于算法的溺水监测系统能够实时监测水域环境中个体的活动状态,识别潜在的溺水风险,并进行及时的报警或干预。Menoud^[83]提出了一种利用水下摄像头监测池底静止人体的方法。Liu 等^[84]通过在游泳池水下布置多个超声波传感器发射和接收声波,通过测量声波的传播时间来计算出游泳者到每个传感器的位置,通过几何算法将多个传感器的距离信息转化成游泳者的三维坐标。Wang 等^[85]通过摄像头采集游泳者图像,利用卷积神经网络进行人体姿态识别,通过算法识别游泳者身体的关键点,通过关键点的位置和角度判断游泳者是否处于溺水状态,并且结合传感器对游泳者的生理状态进行监测,综合判断游泳者是否处于溺水状态。

总体来看,反溺水智能穿戴设备与基于算法的溺水监测系统存在以下不同:

(1) 反溺水智能穿戴设备用于个体预警,能够针对游泳者个人进行保护,并且可以在溺水发生的第一时间警示佩戴者,并且向外发送求救信号,更加适合需要得到额外安全保证的人群,例如老年人和儿童。

(2) 基于算法的溺水监测系统能够分析复杂的溺水场景,利用算法模型对危险进行预测和判断,侧重于群体监测,能够覆盖整个水域,实时监测多人状态,减少人为疏忽,更适用于泳池、海滩等公共场所的监控,及时发现溺水风险。但溺水监测系统在成本和复杂性上远远超过反溺水智能穿戴设备^[86],如果有太多的游泳者,很可能出现阻塞问题。通过摄像头来监测游泳者姿态变化,光线的反射和折射以及水波的干扰会影响图像质量,并且通过这种方法监测到的特征不容易区分溺水者和潜泳者^[87]。

在实际的应用中,可以将两者有效结合,以提高溺水救援的效率和准确性。在公共水域,穿戴设备可以作为个体安全保障,而图像识别系统则负责整体水域的安全管理。

5 结论与展望

本文深入分析了反溺水智能穿戴设备的溺水监测方式、溺水报警方式、溺水救助方式,并比较了不同穿戴位置对救助效果的影响。

(1) 在不同的溺水监测方式中,心率监测应用最为广泛;而采用多种不同类型溺水监测方式组合的监测更为精准。

(2) 在不同的溺水报警方式中, 蓝牙通信方式在短途通信中效果最好; 在海上救援场景中, 北斗通信可以发挥重要作用; 在一些封闭的场所或防跌落场景中, 采用蜂鸣器或灯光报警效果更好。针对不同的使用场景采取相对应的适宜通信方式才能够发挥最好的救援效果。

(3) 在溺水救助方式中, 手动打开气囊的救援方式设备简易、操作简单、可控性强, 已有成熟产品面市; 自动开启气囊有着实时响应、无需人工干预的优势, 能够提高救援效率; 手动气囊结合自动式气囊设备在实际应用能够为佩戴者提供最好的灵活性。

(4) 目前反溺水智能穿戴设备多数布置在手腕, 相比于其他位置具有灵活度高、复杂度低、成本低的优势。

与基于算法的溺水监测系统相比, 反溺水智能穿戴设备在溺水救援方面具有更广泛的应用前景, 同时也面临许多机遇和挑战:

(1) 反溺水智能穿戴设备通常需要持续稳定地供电来支持各种模块的正常工作, 但因受限于设备大小与质量需求, 电池可能会出现续航不足的现象, 如何平衡电池容量与大小, 这在后续研究中将是一项重大挑战。

(2) 反溺水穿戴设备依靠传感器监测使用者状态, 但单一传感器无法满足对使用者生理状态的全面监测, 需要集合不同类型传感器综合监测, 不同传感器之间良好协作还需要进一步研究。

(3) 反溺水穿戴设备作为面向个人的新型救援产品, 不仅需要定期检查维护, 还需要准确向使用者普及使用指南, 才能够确保其正常工作, 未来需要进一步普及反溺水穿戴设备知识。

(4) 不同使用群体对反溺水穿戴设备的需求不同, 儿童可能因设备尺寸不合适而无法正确佩戴, 老年人可能对设备操作不够熟悉, 残障人士可能需要更为个性化的设计。如何平衡不同群体之间的需求, 也是未来需要进一步解决的问题。

(5) 尽管现有反溺水智能穿戴设备在溺水救援中展现了显著的优势, 但还需要制定相应政策推动这一技术的更广泛应用, 解决其实施中的瓶颈。如政府设置专项基金鼓励企业、研究机构 and 高等院校加大对反溺水智能穿戴设备的研发投入; 与教育部门合作, 通过社交媒体、学校教育等途径普及溺水防护知识, 增强人们对反溺水智能穿戴设备的了解, 确保设备的普及不仅局限于儿童、青少年等潜在的高风险群体, 还能够覆盖成人, 从而推动这一技术的应用。

参考文献:

- [1] World Health Organization. Preventing Drowning: Practical Guidance for the Provision of Day-Care, Basic Swimming and Water Safety Skills, and Safe Rescue and Resuscitation Training[M]. Geneva: World Health Organization, 2022.
- [2] 人民网舆情数据中心, 人民在线. 2022 中国青少年防溺水大数据报告[EB/OL]. (2022-08-08)[2023-11-06]. <https://www.1608.cn/pptx/70444.html>. People's Daily Online Public Opinion Data Center, People Online. 2022 China Youth Drowning Prevention Big Data Report[EB/OL]. (2022-08-08)[2023-11-06]. <https://www.1608.cn/pptx/70444.html>(in Chinese).
- [3] United Nations General Assembly. Global drowning prevention: Resolution / adopted by the General Assembly[R]. New York: United Nations General Assembly, 2021.
- [4] United Nations General Assembly. Accelerating action on global drowning prevention[R]. New York: United Nations General Assembly, 2023.
- [5] 孙海涛, 江远航, 梅新潮, 等. 基于心率检测的儿童溺水呼救报警系统设计[J]. 电脑与电信, 2022, (10): 7-11. SUN H T, JIANG Y H, MEI X C, et al. Design of children drowning alarm system based on heart rate detection[J]. Computer & Telecommunication, 2022, (10): 7-11(in Chinese).
- [6] 张继超, 赵野, 陈雁多, 等. 基于安全气囊气体发生器的溺水自救手环的研究[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(12): 121-122, 134. ZHANG J C, ZHAO Y, CHEN Y D, et al. Research on drowning self rescue bracelet based on airbag gas generator[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2021, 47(12): 121-122, 134(in Chinese).
- [7] JALALIFAR S, KASHIZADEH A, MAHMOOD I, et al. A smart multi-sensor device to detect distress in swimmers[J]. Sensors, 2022, 22(3): 1059.
- [8] SHEHATA A M, MOHAMED E M, SALEM K L, et al. A survey of drowning detection techniques[C]//2021 International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC). Cairo, Egypt: IEEE, 2021: 286-290.
- [9] ZHANG C, LI X G, LEI F. A novel camera-based drowning detection algorithm[C]// Advances in Image and Graphics Technologies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 224-233.
- [10] SALEHI N, KEYVANARA M, MONADJEMMI S A. An automatic video-based drowning detection system for swimming pools using active contours[J]. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, 2016, 8(8): 1-8.
- [11] KAO W C, FAN Y L, HSU F R, et al. Next-generation swimming pool drowning prevention strategy integrating AI and IoT technologies[J]. Heliyon, 2024, 10(18): e35484.

- [12] HEMALATHA S, NANDHINI P, VIMALA J, et al. Automated drowning detection and security in swimming pool[J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017, 4(6): 17-21.
- [13] ZHU Y J, JALALIFAR S, PHAN H P, et al. A smart multi-sensor drowning detection device with real-time alarm function[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(4): 7163-7170.
- [14] ALHARBI N. Exploring advance approaches for drowning detection: A review[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2024, 14(4): 16032-16039.
- [15] REDDY K S. The Essentials of Forensic Medicine and Toxicology[M]. New Delhi, India: Jaypee Brothers Medical Publishers, 2014: 348-357.
- [16] WU J, CAI J, HUO M, et al. A wearable early monitoring and alarming device for swimming pool drowning incidents[J]. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9(21): 8619-8627.
- [17] NGUYEN D B, LE MINH T, VAN TRUC N, et al. Building a smart life jacket based on the IoT platform[C]//2023 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). Da Nang, Vietnam: IEEE, 2023: 527-533.
- [18] DENG Y, ZHOU T H. Sensor-based self-rescue alarm system for the prevention of child drowning[C]//2021 13th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics(IHMSC). Hangzhou, China: IEEE, 2021: 168-171.
- [19] LUNETTA P. Drowning[M]//Asphyxiation, Suffocation, and Neck Pressure Deaths. Boca Raton, USA: CRC Press, 2020: 260-284.
- [20] MODELL J H. Drowning: To treat or not to treat--an unanswerable question?[J]. Critical Care Medicine, 1993, 21(3): 313-315.
- [21] BANTING F G, HALL G E, JANES J M, et al. Physiological studies in experimental drowning (A): Preliminary report[J]. Canadian Medical Association Journal, 1938, 39(3): 226-228.
- [22] LUND F K, TORGERSEN J G R, FLAATTEN H K. Heart rate monitored hypothermia and drowning in a 48-year-old man survival without sequelae: A case report[J]. Cases Journal, 2009(1): 1-6.
- [23] 黄家莹, 詹杰. 基于 ZigBee 无线定位的游泳池溺水自动报警系统[J]. 科学技术创新, 2019(13): 69-72.
HUANG J Y, ZHAN J. Automatic alarm system for swimming pool drowning based on ZigBee wireless positioning[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(13): 69-72(in Chinese).
- [24] GANESAMOORTHY B, MOHANPRASATH R, KAMALRAJ A, et al. Automated drowning detection and security in swimming pool with IoT server[C]//2023 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN). Puducherry, India: IEEE, 2023: 1-5.
- [25] 洪必莹, 何森, 陈晓平. 心率变异性研究进展[J]. 华西医学, 2013, 28(4): 614-618.
HONG B Y, HE S, CHEN X P. Research progress of heart rate variability[J]. West China Medical Journal, 2013, 28(4): 614-618(in Chinese).
- [26] 陈孝英. 基于 STM32 的血氧心率检测仪的研制[D]. 济南: 山东大学, 2017.
CHEN X Y. A design about the measure of blood oxygen saturation and heart rate based on STM32[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2017(in Chinese).
- [27] 王岩松, 冯芳, 杜青, 等. 手腕式血氧心率检测仪的设计[J]. 电工技术, 2022, (22): 195-198, 201.
WANG Y S, FENG F, DU Q, et al. Design of wrist blood oxygen and heart rate detector[J]. Electric Engineering, 2022(22): 195-198, 201(in Chinese).
- [28] 徐玉菁. 基于 MSP430 单片机的便携式血氧仪的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2018.
XU Y J. Design and implementation of MSP430 microcontroller-based portable oximeter[D]. Nanjing: Southeast University, 2018(in Chinese).
- [29] 黎圣峰, 庞宇, 高小鹏, 等. 便携式血氧信号检测装置设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 110-112, 119.
LI S F, PANG Y, GAO X P, et al. Design of portable oxygen signal detection device[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(3): 110-112, 119(in Chinese).
- [30] 吴洁, 李凯扬. 基于 AFE4404 的脉搏血氧检测系统[J]. 现代电子技术, 2019, 42(4): 10-13.
WU J, LI K Y. Pulse and blood-oxygen detection system based on AFE4404[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(4): 10-13(in Chinese).
- [31] BANARJEE I, DE S, GOSWAMI A. Design of drowning prevention scheme with efficient routing protocol for underwater wireless sensor network[C]//2022 IEEE 19th India Council International Conference(INDICON). Kochi, India: IEEE, 2022: 1-6.
- [32] 吕心胜. 可穿戴反射式脉搏血氧饱和度监护系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
LYU X S. Design and implementation of a wearable reflection pulse oxygen saturation telemonitoring system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016 (in Chinese).
- [33] WEST J B, LUKS A M. West 呼吸生理学精要[M]. 詹庆元, 译. 北京: 北京大学医学出版社. 2018.
WEST J B, LUKS A M. West's Respiratory Physiology [M]. Translated by ZHAN Q Y. Beijing: Peking University Medical Press 2018(in Chinese).
- [34] 柳鹏. 基于移动终端的呼吸频率实时监护研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.

- LIU P. The study of respiration-rate real-time monitoring based on mobile terminal[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2016(in Chinese).
- [35] 袁懋结. 腕式可穿戴多参数睡眠呼吸监测系统的研制[D]. 深圳: 深圳大学, 2020.
- YUAN M J. Development of wrist wearable multi-parameter sleep and respiratory monitoring system[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020(in Chinese).
- [36] 吴梦. 3-6岁小童泳衣蓝牙呼吸监测报警系统研发[D]. 西安: 西安工程大学, 2019.
- WU M. Research and development of bluetooth respiration monitoring and alarm system for 3-6 years old children's swimwear[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2019(in Chinese).
- [37] 王玉林. 基于塑料光纤的可穿戴健康监测系统研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
- WANG Y L. Study of wearable health monitoring system based on plastic optical fiber[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022(in Chinese).
- [38] HUNSUCKER J L, DAVISON S J. Analysis of rescue and drowning history from a lifeguarded waterpark environment[J]. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 2011, 18(4): 277-284.
- [39] 崔亚龙, 王景丽. 水上智能救生手环系统设计与研究[J]. *信息与电脑*, 2021, 33(10): 73-75.
- CUI Y L, WANG J L. Research on the key technology of aquatic intelligent lifesaving bracelet[J]. *Information & Computer*, 2021, 33(10): 73-75(in Chinese).
- [40] 孙继鲁, 盛虎, 姜程斌, 等. 一种基于 STM32 单片机的水下智能自救系统[J]. *电子测试*, 2021(18): 8-9, 15.
- SUN J L, SHENG H, JIANG C B, et al. An underwater intelligent self rescue system based on STM32[J]. *Electronic Test*, 2021(18): 8-9, 15(in Chinese).
- [41] SIVAKAMI S, JANANI K, JANANI K, et al. Drowning prevention system-at sea level[C]//2017 2nd International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCT). Chennai, India; IEEE, 2017: 370-373.
- [42] ROY A, SRINIVASAN K. A novel drowning detection method for safety of Swimmers[C]//2018 20th National Power Systems Conference(NPSC). Tiruchirappalli, India; IEEE, 2018: 1-6.
- [43] PALANIAPPAN L, SUBRAMANIAM S, KALAISELVI V K G, et al. Drowning detection and prevention system[C]//2022 1st International Conference on Computational Science and Technology (ICCST). Chennai, India; IEEE, 2022: 783-785.
- [44] KHARRAT M, WAKUDA Y, KOSHIZUKA N, et al. Automatic waist airbag drowning prevention system based on underwater time-lapse and motion information measured by smartphone's pressure sensor and accelerometer[C]//2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics(ICCE). Las Vegas, NV, USA; IEEE, 2013: 270-273.
- [45] 丁振. 基于 STM32 的智能化应急救援头盔设计与实现[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- DING Z. Design and implementation of intelligent emergency rescue helmet based on STM32[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018(in Chinese).
- [46] 李榆. 游泳池溺水自动报警系统设计[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- LI Y. Automatic alarm system for drowner in swimming pool[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2020(in Chinese).
- [47] ALQAHTANI A, ALSUBAI S, SHA M, et al. Falling and drowning detection framework using smartphone sensors[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022: 6468870.
- [48] BARKUNAN S R, RADHA J, EGALA R, et al. An novel based mobile dropping sensing to protect using inertia sensor and integration of DL technology[C]//2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering(ICACITE). Greater Noida, India; IEEE, 2024: 115-119.
- [49] ZHANG Y P, LI C Y, WEI C H, et al. An intelligent self-powered life jacket system integrating multiple triboelectric fiber sensors for drowning rescue[J]. *InfoMat*, 2024, 6(5): e12534.
- [50] DANH L V Q, HOAN T N K, PHA H V, et al. An early drowning detection system capable of locating swimmers in real time[C]// *Impact of Artificial Intelligence, and the Fourth Industrial Revolution on Business Success*. Cham, Switzerland; Springer International Publishing, 2023: 175-186.
- [51] 鄢晓曦, 冯弘禄, 张晨旭. Android 可穿戴防溺水报警系统的设计与实现[J]. *电脑知识与技术*, 2020, 16(25): 195-196.
- YAN X X, FENG H L, ZHANG C X. Design and implementation of android wearable anti drowning alarm system[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2020, 16(25): 195-196(in Chinese).
- [52] ZHU T X, NI Y M, ZHAO K Y, et al. A breathable knitted fabric-based smart system with enhanced superhydrophobicity for drowning alarming[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(11): 18018-18026.
- [53] ZHANG R, YE S X, SUZUKI R, et al. Carbon nanotube modified cellulose nonwovens: Superhydrophobic, breathable, and sensitive for drowning alarm and motion monitoring[J]. *Cellulose*, 2024, 31(5): 3143-3161.
- [54] JOHNSON M B, LAWSON K A. Evaluation of the WAVE Drowning Detection System TM for use with children's summer camp groups in swimming pools: A prospective observational study[J]. *International Journal of Critical Illness and Injury Science*, 2022, 12(4): 184-189.
- [55] 邹旭, 廖钟豪, 王廷军, 等. 基于 zigbee 通信模块的泳池防

- 溺水智能泳帽的研究[J]. 科技风, 2018, (34): 70.
- ZOU X, LIAO Z H, WANG T J, et al. Research on intelligent swimming cap for swimming pool drowning prevention based on zigbee communication module[J]. Ke Ji Feng, 2018, (34): 70 (in Chinese).
- [56] HARIHARAN B, DAS R N, ARJUN S. WiEyeTNB: A wireless sensor based drowning detection system for enhanced parental care[C]// Wireless Internet. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 511-520.
- [57] KABIR M, MUMMADI T S, SUNDARAVADIVEL P. Poster: Towards edge-intelligent wearable for early drowning detection[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Underwater Networks & Systems. Boston MA USA: ACM, 2022: 1-2.
- [58] 徐振福. ZigBee 技术在智能家居系统中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- XU Z F. ZigBee technology in the application of smart home[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014 (in Chinese).
- [59] 蔡型, 张思全. 短距离无线通信技术综述[J]. 现代电子技术, 2004(3): 65-67, 76.
- CAI X, ZHANG S Q. A summary of short-range wireless communication[J]. Modern Electronics Technique, 2004(3): 65-67, 76 (in Chinese).
- [60] ALSHUHAIL A S, BHATIA S, KUMAR A, et al. Zigbee-based low power consumption wearables device for voice data transmission[J]. Sustainability, 2022, 14(17): 10847.
- [61] ZOHOURIAN A, DADKHAH S, NETO E C P, et al. IoT Zigbee device security: A comprehensive review[J]. Internet of Things, 2023, 22: 100791.
- [62] 崔昆涛, 孙文强, 夏国忠. 基于北斗技术的海上安全与通信系统[J]. 中国航海, 2015, 38(4): 15-17, 47.
- CUI K T, SUN W Q, XIA G Z. Beidou-technology-based maritime safety and communication system[J]. Navigation of China, 2015, 38(4): 15-17, 47 (in Chinese).
- [63] 妙红英. 基于北斗卫星通信的偏远地区用电信息采集[J]. 电子设计工程, 2015, 23(10): 152-154, 158.
- MIAO H Y. Electric energy data acquisition by Beidou satellite communication in remote region[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(10): 152-154, 158 (in Chinese).
- [64] 薛文峰, 俞舜廷, 黄家梓, 等. 基于北斗通信的智能报警救生衣研发与示范应用[J]. 现代农业装备, 2024, 45(4): 35-42.
- XUE W F, YU S T, HUANG J Y, et al. Electric energy data acquisition by Beidou satellite communication in remote region[J]. Modern Agricultural Equipment, 2024, 45(4): 35-42 (in Chinese).
- [65] 吴忻舟, 王一凡, 刘晓雨, 等. 基于北斗定位模块的自闭症儿童智能服装设计[J]. 上海纺织科技, 2023, 51(4): 20-23.
- WU X Z, WANG Y F, LIU X Y, et al. Intelligent clothing design for autistic children based on Beidou positioning module[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2023, 51(4): 20-23 (in Chinese).
- [66] 孙永泉. 可穿戴救生装置开发及浴场智能救生系统设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- SUN Y Q. Development of wearable life saving device and intelligent life-saving system design for bathing beaches [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019 (in Chinese).
- [67] WEN J, ZHOU D, FENG H R, et al. LifeTag: Vital sign detection for drowning people in sea accidents by wearable device[C]//Proceedings of the 2019 8th International Conference on Networks, Communication and Computing. Luoyang, China: ACM, 2019: 57-64.
- [68] 李培正, 万德松, 姚克波, 等. 基于 AIS 的智能救生衣的设计和实现[J]. 中国水运, 2021, 21(4): 5-7.
- LI P Z, WAN D S, YAO K B, et al. Based on AIS the design and implementation of an intelligent life jacket[J]. China Water Transport, 2021, 21(4): 5-7 (in Chinese).
- [69] 林洺充. 基于 LabVIEW 和 AIS 接收的飞机救生筏端救援平台研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
- LIN M C. Research on aircraft life raft terminal rescue platform based on LabVIEW and AIS reception[D]. Tianjin: Tiangong University, 2023 (in Chinese).
- [70] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗 2.1 协议编号【BD420007-2015】-北斗用户终端 RDSS 单元性能要求及测试方法[S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2015.
- China Satellite Navigation Office. BeiDou 2.1 Protocol [BD42-0007-2015]-Performance Requirements and Test Methods for RDSS Unit of BeiDou User Terminal[S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2015 (in Chinese).
- [71] WOO-GARCIA R M, HERRERA-NEVRAUMONT V, OSORIO-DE-LA-ROSA E, et al. Location monitoring system for sailboats by GPS using GSM/GPRS technology[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2023, 15(2): 69-72.
- [72] LI Z B, DAI J F, LUAN Y X, et al. LR-MPIBS: A LoRa-based maritime position-indicating beacon system[J]. Applied Sciences, 2024, 14(3): 1231.
- [73] SAMUEL N J, UKPABIO I G, OMORUYI O, et al. Design of a drowning rescue alert system[J]. International Journal of Mechanical Engineering & Technology, 2019, 10(1): 1987-1995.
- [74] ZHOU T Y, YANG J, LONG Q, et al. Design of an intelligent water-rescue life jacket system based on satellite positioning[C]//2023 13th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME). Wuyishan, China: IEEE, 2023: 510-514.
- [75] 邓烈威. 游泳池溺水预警系统的软硬件设计[D]. 哈尔滨: 哈

- 尔滨工程大学,2015.
- DENG L W. Software and hardware design for swimming pool alarming system[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2015(in Chinese).
- [76] SINDHUJA S, JOE P M T. MEMS based-self regulating airbag drowning aversion system for submerged swimmers[C]//2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015]. Nagercoil, India; IEEE, 2015: 1-4.
- [77] RAMANI J G, GAYATHRI J, ASWANTH R, et al. Automatic prevention of drowning by inflatable wrist band system[C]//2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS). Coimbatore, India; IEEE, 2019: 346-349.
- [78] 全刘辉,李玉香,澹台梦阳,等. 基于无线通信的视觉识别自动救生系统的设计[J]. 电脑知识与技术,2024,20(9): 96-98.
- QUAN L H, LI Y X, TAN TAI M Y, et al. Design of visual recognition automatic lifesaving system based on wireless communication[J]. Computer Knowledge and Technology,2024,20(9):96-98(in Chinese).
- [79] 张晶. 防溺水微控制系统的设计[J]. 晋中学院学报,2017,34(3):85-87.
- ZHANG J. Design of a micro control system for drowning prevention[J]. Journal of Jinzhong University,2017,34(3):85-87 (in Chinese).
- [80] 雒珊,杨嘉航,刘洪瑞. 基于无线通信的游泳池主动式呼救装置[J]. 电脑与电信,2021(4):47-50.
- LUO S, YANG J H, LIU H R. Active calling device for swimming pool based on wireless communication[J]. Computer & Telecommunication,2021(4):47-50(in Chinese).
- [81] NGUYEN D B, LE MINH T, VAN TRUC N, et al. Building a smart life jacket based on the IoT platform[C]//2023 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). Da Nang, Vietnam;IEEE, 2023: 527-533.
- [82] KULKARNI A, LAKHANI K, LOKHANDE S. A sensor based low cost drowning detection system for human life safety[C]//2016 5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO). Noida, India; IEEE, 2016: 301-306.
- [83] MENOUD E. Alarm and monitoring device for the presumption of bodies in danger in a swimming pool: US5886630[P]. 1999-03-23.
- [84] LIU H B, BEN HAJ FREJ M, WEN B. A novel method for recognition, localization, and alarming to prevent swimmers from drowning[C]//2019 IEEE Cloud Summit. Washington, DC, USA; IEEE, 2019: 65-71.
- [85] WANG W, WANG Z H, WANG Q T, et al. Intelligent monitoring drowning early warning system[C]//2022 6th International Conference on Advances in Image Processing. Zhanjiang, China; ACM, 2022: 91-96.
- [86] ENG H L, TOH K A, YAU W Y, et al. DEWS: A live visual surveillance system for early drowning detection at pool [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(2): 196-210.
- [87] LU W M, TAN Y P. A vision-based approach to early detection of drowning incidents in swimming pools[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(2): 159-178.

本文引文格式:

杨瑞梁,刘重言. 防溺水智能穿戴设备的研究进展[J]. 天津工业大学学报,2025, 44(4): 83-94.

YANG R L, LIU Z Y. Research advances in anti-drowning smart wearable devices [J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(4): 83-94(in Chinese).