

基于吞咽监测技术的溺水自主救援产品设计研究

曾曦, 杨睿雯*

(武汉工程大学, 武汉 430205)

摘要: **目的** 通过对溺水自主救援产品的再设计, 为游泳人群寻找更好的溺水自救途径。**方法** 以溺水者的自主救援需求为导向, 运用观察法与情景分析法对溺水者的各种生理表象进行观测、记录及实验比对, 确定“呛咳”是有效判断溺水的唯一表象。借助“呛咳”与“吞咽”时喉部肌肉运动方式的一致性, 运用吞咽监测技术间接识别“呛咳”的发生, 并通过实验验证水下环境中吞咽监测技术识别“呛咳”的可行性。**结果** 溺水状态下的“呛咳”信号呈现特征性变化规律且与正常“呛咳”信号差异显著。**结论** 吞咽监测技术能够准确识别溺水状态, 并有效应用于溺水自主救援产品设计中, 其提高了溺水者的自救成功率, 减少了溺水事故的发生。

关键词: 产品设计; 溺水自主救援产品; 情景分析法; 吞咽监测技术

中图分类号: TB472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)10-0052-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.10.006

Design of Drowning Self-rescue Product Based on Swallowing Monitoring

ZENG Xi, YANG Ruiwen*

(Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

ABSTRACT: The work aims to find a better way for swimmers to save themselves from drowning through the redesign of the drowning self-rescue products. Guided by the self-rescue needs of drowning people, observation, recording and experimental comparison of various physiological phenomena of drowning people were carried out by using observation method and situational analysis, determining that "coughing" was the only phenomenon that could effectively judge drowning. With the help of the consistency of throat muscle movement during "coughing" and "swallowing", the swallowing monitoring technology was used to indirectly identify the occurrence of "coughing", and the feasibility of using swallowing monitoring technology to identify "coughing" in the underwater environment was verified through experiments. The results showed that the "coughing" signal in the drowning state showed a characteristic change pattern and was significantly different from the normal "coughing" signal. In conclusion, the swallowing monitoring technology can accurately identify the drowning state, and can be effectively applied to the design of drowning self-rescue products. It improves the success rate of self-rescue and reduces the occurrence of drowning accidents.

KEY WORDS: product design; drowning self-rescue products; scenario analysis; swallowing monitoring techniques

据 2020 年世界卫生组织发布的报告, 全球每年因溺水造成的死亡人数高达 37.2 万。溺水事故不仅对涉事家庭造成巨大伤害, 也对社会造成了巨大损失^[1-2]。尽管相关部门投入了大量人力、物力以完善水域安全保障体系并加强执行力度, 但仍难以杜绝。关键在于溺水者未能及时发现或未采取有效的自

救措施。

现有多种溺水救援产品在判断溺水方面具有显著作用。强夕竹等^[3]研究了 GPS 定位技术和声学技术的相互关系, 开发出一种可迅速定位溺水者并及时通知救生员的报警系统。Dehbashi 等^[4]研发出基于射频识别 (RFID) 技术的溺水预警系统, 通过读取佩戴

收稿日期: 2023-12-21

基金项目: 教育部中国高校产学研创新基金-新一代信息技术创新项目 (2020ITA02056)

*通信作者

在游泳者腕部的 RFID 标签信息实现溺水监测。符式培等^[5]运用芯片感应系统测量游泳者的心跳和呼吸速率，结合 GPS 定位、GSM 通信等模块，设计了一款可快速获取溺水者位置的泳衣。Zhang 等^[6]通过搭建泳池场景数据集并将游泳者的正常活动数据与异常数据进行分析、比对以判断溺水。

上述研究聚焦于对溺水者某些特殊生理表象的判断，利用监测产品捕捉这些特殊生理表象的异常以快速发现溺水者，从而加快施救进程。若溺水者能在第一时间进行自我救援，则溺水事故率会更大幅地降低。基于此，本文深入研究溺水者的各种生理表象，并提出利用“呛咳”识别“溺水”的方法。鉴于“呛咳”与“吞咽”行为的密切关联，提出采用吞咽监测技术识别“呛咳”并设计实验以验证其可行性。依据研究结果构建溺水自主救援产品的设计策略，并完成相应的设计实践。

	产品图例	代表性产品	使用方式	使用功能
预防性产品		救生衣	穿戴于上半身	帮助用户始终漂浮于水面
		救生圈	置于腋下	帮助用户始终漂浮于水面
		救援气囊	用绳子系于腰间	气囊跟随在用户身后
救援性产品		溺水自救手环	佩戴于手腕	拉动开关、气囊弹出
		防溺水项圈	佩戴于颈部	拉动开关、气囊弹出

图 1 现有溺水救援产品使用方式
Fig.1 Use of existing drowning rescue products

2 准确识别“溺水”的生理表象选择

2.1 溺水者的行为及其关联生理特征分析

生理特征是指有关人体生理状态和功能的特征指标，能够反映人身体的健康状况^[7]。它受外界环境影响，可通过医学参数直观地反映。

溺水发生时，溺水者起初会屏住呼吸以避免呛水，并保持近乎直立的姿态以不断挣扎，后因缺氧被迫进行呼吸，水从口鼻进入溺水者的呼吸道和肺部，导致其反复“呛咳”，从而引发呼吸急促和缺氧，最后造成呼吸停止和心脏停搏^[8]。在短暂的几分钟内，溺水者的部分生理表象会发生明显变化，这对溺水的识别至关重要，具体分析如表 1 所示。

2.2 溺水者生理表象选择

溺水状态下，人体诸多生理表象会呈现规律性的变化趋势，但受环境与技术限制，并非所有生理表象均能有效反映溺水。

1 现有溺水救援产品缺陷

现今，游泳人群常用的水上救援产品均不具备自主救援功能，其使用方式如图 1 所示。常见的产品有两类，分别是：（1）救生衣、游泳圈等，这类产品能确保游泳者始终漂浮在水面上，但体积大且笨重，会对游泳者行动造成一定阻碍；（2）佩戴于手部、颈部等部位的可穿戴式产品，这类产品小巧美观，不会影响游泳者的正常活动，同时能够为游泳者提供救援，但救援开关需手动触发，这增加了溺水者在危急时刻的自救难度。为解决上述问题，笔者探求一种可穿戴式溺水自主救援产品，旨在能够识别游泳者状态，并在溺水时展开自主救援。该产品应具备的特点如下。

1）产品小巧轻便，不会影响游泳者的正常活动。

2）产品能够实时监测人体的某种生理表象，以判断是否溺水。

3）溺水发生时，产品立即实施救援操作。

表 1 溺水生理表象分析 Tab.1 Analysis on physiological appearance of drowning		
行为/ 生理特征	特征描述	原因
血压	血压值升高	缺氧导致血压升高
呛咳	连续呛咳	水从口鼻进入呼吸道而导致“呛咳”
心率	心率急速加快	缺氧导致心率加快
血氧	血氧含量降低	缺氧导致血氧含量降低

溺水致使身体处于缺氧状态从而引发血压升高。但不同人群血压的数值范围存在差异，且测量时需处于安静和放松的状态以确保结果准确，故无法利用血压变化规律来识别是否溺水。

溺水者被迫在水中进行呼吸，会刺激呼吸道和肺部内的感受器，引起咳嗽反射而造成不间断性“呛咳”，这与正常游泳人群存在明显差异。故“呛咳”能够作为溺水的生理表象进行深入研究。

心率与血氧饱和度是两种重要的医学评估指标。多项研究表明心率的变化能够作为识别人体状态的重要参考依据；血氧饱和度是动脉血液中氧气含量占总血红蛋白容量的百分比^[9]，能够反映机体供氧状况。为探究心率或血氧饱和度变化数据能否作为评估溺水状态的可行性指标，设计实验加以验证。

2.2.1 实验内容与方法

实验选取 5 位被试者进行相关数据的测量，使用指夹式脉搏血氧仪测量心率与血氧饱和度的变化情况，实验设备如图 2 所示，实验共分为两组，实验内容如表 2 所示。

2.2.2 实验结果分析

提取实验关键性数据，绘制出各被试者心率与血

氧饱和度的变化折线图，如图 3 所示。研究表明，溺水的黄金救援时间是 30 s^[10]。故以 30 s 为时间临界点验证测量指标判断溺水的可靠性。



图 2 实验过程
Fig.2 Experimental process

表 2 实验内容
Tab.2 Experimental content

编号	测量指标	实验方法	实验目的
1	心率	被试者憋气 1 min，记录该段时间内心率的变化情况	探究溺水状态下人体心率的变化规律
2	血氧饱和度	被试者憋气 1 min，记录该段时间内血氧饱和度的变化情况	探究溺水状态下人体血氧饱和度的变化规律

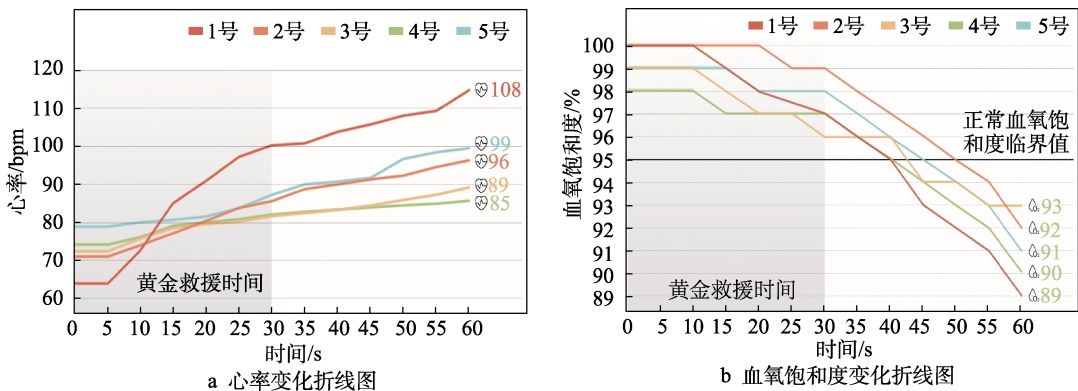


图 3 心率与血氧饱和度变化折线图
Fig.3 Heart rate and oxygen saturation curve

由图 3a 可知，所有被试者的心率变化均呈上升趋势。受到被试者静息心率和身体素质等因素的影响，同时间段内的心率增幅与峰值心率均存在显著差异，无法总结出适用于所有人群的心率数值变化规律。

正常人体的血氧饱和度为 95%及以上。由图 3b 可知，在前 30 s，被试者的血氧饱和度均维持在正常范围内，40 s 后数值迅速降至危险范围。在前 30 s 的黄金救援时间内，血氧饱和度在数据上未出现异常，故无法作为判断溺水的特征性指标。

提高溺水救援成功率的第一步是寻找一种快速判断溺水状况的生理表象，对其进行观察和分析，而结合实验结果可知，准确识别“呛咳”是快速有效地判断溺水状态的唯一途径。

3 水下环境中吞咽监测技术的可行性研究

目前，对“呛咳”的识别尚未形成对这一动作表

象本身直接且成熟的技术方法，故需要采取其他间接手段判断人体是否出现“呛咳”。喉部“呛咳”时，会导致呼吸肌肉和喉肌肉的收缩，这一肌体特征与“吞咽”动作极为相似。尽管“呛咳”和“吞咽”在目的和功能方面均有差异，因“呛咳”与“吞咽”时喉部肌肉的运动方式保持一致，故利用吞咽监测技术识别“呛咳”是合理、有效且可行的。随着硬件智能技术的发展，吞咽监测技术已从医学领域逐渐推广至具备生理特征监测功能^[11]的可穿戴式产品中。运用该技术的可穿戴式产品通常直接贴合喉部，与麦克风、压电传感器、屈曲传感器等设备协同作用，采集多种有关时长、频率的吞咽运动特征。利用吞咽监测技术获取的信号数据能够完成对“呛咳”的初步识别，这为吞咽监测技术在溺水救援领域的应用提供了可能性。

3.1 水下环境中吞咽监测技术的信号选择

为高效识别游泳者的实时状态，需对众多利用吞

咽监测技术获取的生理信号进行筛选。由于游泳的运动特性，信号采集设备需小巧，采集方式需简单。通过对比各生理信号采集设备的形式、信号获取方式及内容，发现音频信号能够准确反应“呛咳”的持续时间、强度、频率等相关信息，只需在喉部佩戴传感器即可获取信号数据。因此，选取音频信号作为实验采集的信号类型。

3.2 音频信号特性

音频信号是机械波波长和强度变化的信息载体。当人体声带振动时，呼出的气流转化为振动气流从而发出声音，其频率一般在 250 Hz 至 4 000 Hz，音量约在 40 dB 左右。“呛咳”是一种生理反应，当水等液体进入肺部后，呼吸系统会条件反射地将异物排出。在这个过程中，由于喉部肌肉反应和身体的冲击，声带发生振动，从而导致发出的声音波形与原本正常的音频信号产生差异，声音的频率、幅度和持续时间等参数也会随之发生巨大改变。目前吞咽监测技术的应用尚未拓展至水下环境，故设计实验加以验证。

3.3 吞咽监测技术的可行性实验

3.3.1 实验技术支撑

利用声音传感器能够实现对音频信号的采集。这

类传感器可以接收声波，并将声音强度大小转换成可视化的图像，以便于研究声音的波形变化。目前的传感器技术能够有效识别出人体喉部发出的所有音频信号，满足了“呛咳”信号采集及数据的处理需求。

3.3.2 实验目的与方法

为探究吞咽监测技术能否根据人体喉部的音频信号特征有效识别游泳者的“呛咳”情况，并判断溺水状态，设计相关实验进行验证。利用专业设备采集实验所需音频信号，并对其进行处理。收集各组实验数据，观察、比对并总结信号数据的特征与差异，以验证吞咽监测技术识别溺水的可行性。

3.3.3 实验过程与实验数据

实验分为 A、B 两组并对照进行，分别验证在水下环境中吞咽监测技术识别“呛咳”的可行性与准确性，以及溺水状态时“呛咳”信号的变化规律。提前录制“吞咽”声及“呛咳”声以模拟正常与溺水状态的声音源。实验在泳池进行，用发声设备播放音频以模拟游泳者的发声状态，用收音设备采集声音。实验内容如表 3 所示，实验设备如图 4 所示。每组实验分别进行 3 次以减小误差，并使用 Adobe Audition 将收集到的音频信号转化为音频图以便进行后续数据的比对。

表 3 实验内容
Tab.3 Experimental content

对照实验组	编号	播放音频	设备位置	游泳者位置	实验目的
对照实验 A	1	吞咽声	水面下方 10 cm	水下	探究水下环境中识别“呛咳”的准确性
	2	呛咳声	水面下方 10 cm	水下	
对照实验 B	3	呛咳声	水面上方 30 cm	水上	探究溺水时“呛咳”信号的变化规律
	4	呛咳声	水面下方 10 cm	水下	
	5	呛咳声	水面上方 30 cm 至下方 10 cm 来回运动	水面上下挣扎	



图 4 实验设备
Fig.4 Experimental equipment

3.3.3.1 对照实验 A

为验证在水下环境中吞咽监测技术仍能够准确识别“呛咳”，设计并完成对照实验 A。实验包含 2 组，固定发声设备与收音设备，分别在水下播放“吞咽”声与“呛咳”声。实验数据波形图如图 5 所示。



图 5 对照实验 A 音频信号波形图
Fig.5 Audio signal waveform of control experiment A

对比两组实验发现，两组音频信号的音量与频率数据均存在明显差异。“吞咽”信号音量低、波动小、频率慢，而“呛咳”信号音量高、波动大、频率快。根据此差别可以推断，在水下环境中吞咽监测技术能

够有效识别“呛咳”信号。

3.3.3.2 对照实验 B

为探究溺水状态时“呛咳”信号的变化规律，设计并完成了对照实验 B。实验包含 3 组，固定发声设备与收音设备，并以相同音量播放“呛咳”声。仅改变发声装置在垂直方向的位置，分别模拟游泳者在水上、水下，以及在水面上下挣扎时的“呛咳”状态。实验数据波形图如图 6 所示。

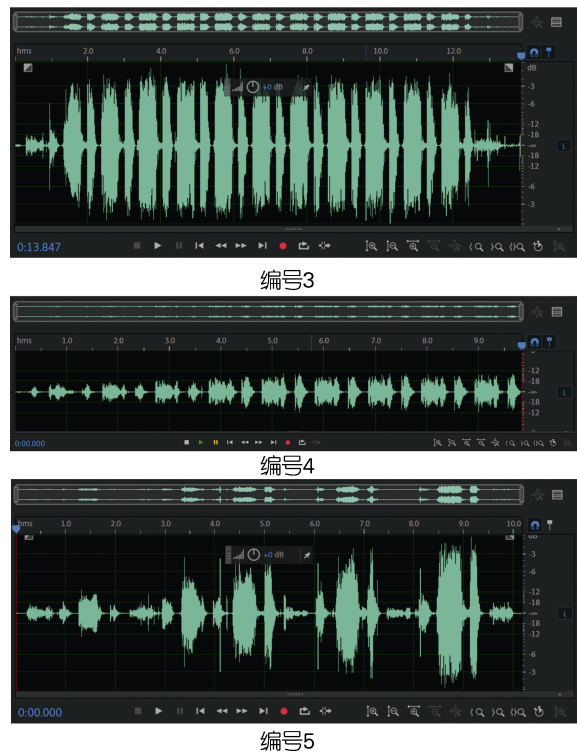


图 6 对照实验 B 音频信号波形图
Fig.6 Audio signal waveform of control experiment B

对比编号 3 和编号 4 的数据可知，信号频率在两组数据中无明显差别，但编号 3 中的音量变化更为剧烈且整体大于编号 4。基于上述规律，可以推断声音源处于水上或水下时，“呛咳”信号存在巨大差异，利用该特征能够判断游泳者在垂直方向上距离水面的位置。

编号 5 的信号数据与前两组相比，存在较大差异，其音量波动较大且逐渐加剧，信号频率表现出不规则的变化特征，总体呈变缓趋势。基于上述规律，可以推断当游泳者在水面上下挣扎时，其“呛咳”信号会呈现特殊的变化规律，利用该特征能够判断游泳者是否处于溺水状态。

3.4 实验结论

通过设计并完成吞咽监测技术在水下环境中识别“呛咳”的可行性实验，笔者成功获取了正常“吞咽”，以及水上、水下、水面挣扎状态时的“呛咳”信号段，收集实验数据并进行分析比对，得出如下结论。

1) 在水下环境，“吞咽”与“呛咳”信号依然存在较大差异，由此证实了吞咽监测技术在水下环境中识别“呛咳”的可行性。

2) 在声音源分别处于水上与水下时，“呛咳”信号会出现较大变化，以此为依据判断游泳者处于水面上方或浸没于水中。

3) 当“呛咳”信号出现较大波动和不规则的变化特征时，可以判断声音源位置也在不断变化，由此能识别游泳者的实时状态，并判断其是否溺水。

4 基于吞咽监测技术的溺水自主救援产品设计

4.1 产品功能模块说明

基于实验结论，设计出一款兼具监测与救援功能的可穿戴式溺水自救颈环（如图 7 所示），其监测模块为采用内置音频信号传感器的喉部衬垫，可实时监测游泳者的喉部声音并根据音频信号特征判断是否溺水。救援模块为颈环两侧的气仓，仓内的一次性小型液态二氧化碳钢瓶与充气气囊相连，当传感器监测到符合“溺水”特征的“呛咳”信号且持续时间超过 30 s，气囊即可自动充气弹出，从而将游泳者头部托起至水面上方，避免进一步呛水，达到自主救援的目的。

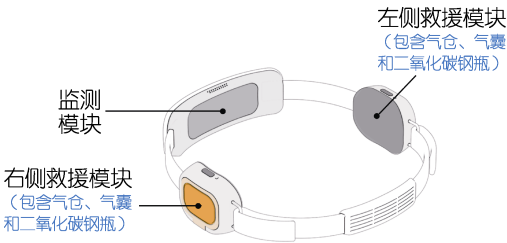


图 7 产品功能模块划分
Fig.7 Product function module division

4.2 监测模块结构及相关材质说明

该产品核心功能的实现依靠吞咽监测技术的支持。由前文分析可知，实现“呛咳”识别的关键性部件是声音传感器，以及能够对音频信号实时收集、分析并作出反馈的信号处理元件。

产品监测模块结构如图 8 所示。为保障颈环监测数据的准确性与稳定性，须使其与喉部贴合，故模块表层采用硅树脂弹性体^[12]。这种材料的柔软性能改善颈环贴合皮肤时所带来的不适。内置的声音传感器实时收集人体喉部发出的声音，并利用微型扬声器放大声音信号特征，以便单片微型计算机对其进行处理和反馈。选择聚二甲基硅氧烷（PDMS）作为包裹传感器的柔性衬底^[13]，并采用石墨烯作为柔性传感器的感应材料^[14]。这些材质的使用可以确保传感器的性能更加稳定，并保持较高的灵敏度和准确度。

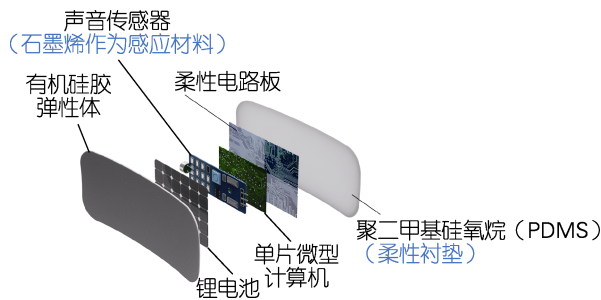


图 8 监测模块结构展示
Fig.8 Structure display of monitoring module

4.3 救援模块结构及相关材质说明

救援模块包含气仓、气囊，以及最为重要的小型二氧化碳钢瓶，如图 9 所示。该模块分布于颈部两侧，其中气仓内侧附弹性硅胶材质的柔性衬垫，以避免佩戴颈环所带来的不适，且其形态小巧，不会对游泳者的活动造成影响。当监测模块判断游泳者已处于溺水状态时，小型二氧化碳钢瓶向气囊瞬间释放大量气体，气囊迅速膨胀并顶开仓盖，通过产生的浮力将溺水者头部托出水面。气囊选用符合国家游泳辅助用具标准的高抗拉强度尼龙材质^[15]，环绕人体颈部并呈对称“C”型，其中气囊前端容积大于后端，即气囊前端提供的浮力大于后端，确保溺水者口鼻位于水面上方，如图 10 所示。

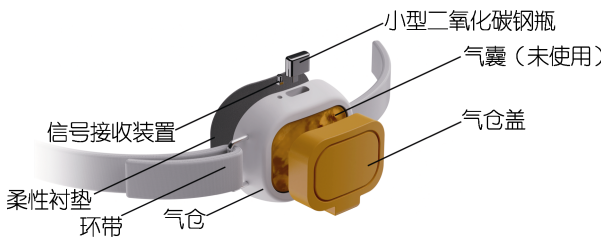


图 9 救援模块结构展示
Fig.9 Structure display of rescue module

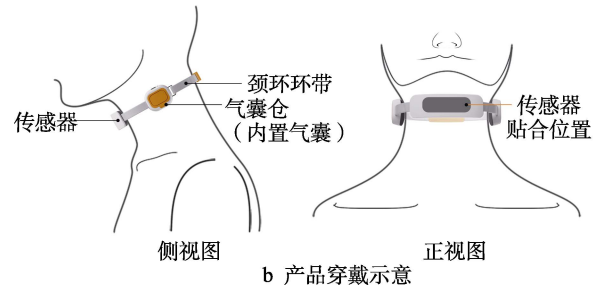
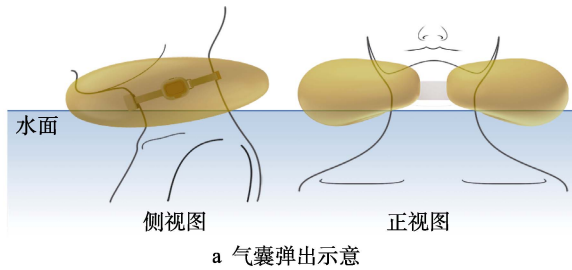


图 10 产品使用示意图
Fig.10 Diagram of product use

4.4 产品人因工程学分析

可穿戴式溺水自救颈环的人因工程参数如下。

1) 颈环环带设置：由于性别、体重等因素的影响，不同人群的颈围数据存在差异，因此将环带的尺寸及调节范围分为 3 种，分别适配于儿童、成年男性和成年女性，相关数据说明如表 4 所示，三视图如图 11 所示。为提升产品佩戴的舒适度，以具有防滑效果的弹性硅胶作为环带材质。

2) 气囊负载设置：中国疾病预防控制中心在 2020 年发布的报告中指出，中国成年男性体重的区间为 47.5~87.5 kg。故将救援模块可承载的人体体重上限设置为 100 kg 以确保其适用于多数人群^[16]。

3) 传感器贴合位置设置：为确保颈环监测的数据准确且稳定，监测信号数据与真实“呛咳”状态及程度需保持一致。因此将传感器与人体颈部气管甲状软骨最突点到达的最高位置^[17]贴合，最大程度地采集游泳者喉部发出的“呛咳”音频。

4) 产品色彩应用：颈环环带及监测模块呈浅灰色，以达到简洁的视觉效果，尽可能地弱化视觉感知；救援模块各部件以鲜艳的亮橙色为主，触发后能及时吸引旁人为溺水者提供救援。

表 4 颈环尺寸及调节范围
Tab.4 Size and adjustment range of neck ring

人群类别	颈围尺寸/mm	颈环可调节范围/mm
男性	310~420	305~425
女性	270~360	265~365
儿童	240~290	235~295

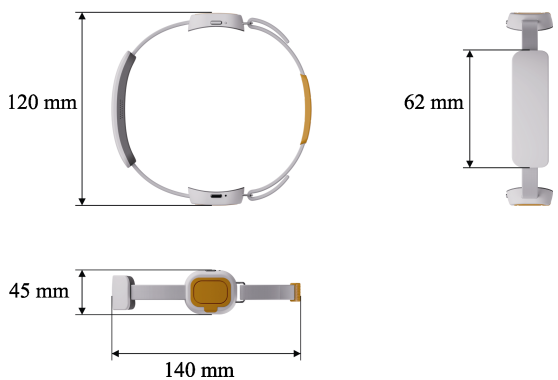


图 11 产品三视图展示
Fig.11 Three-view display of product

4.5 方案展示

基于吞咽监测技术的溺水自救颈环能够实时监测人体喉部发出的音频信号。当颈环监测模块识别到具有溺水特征的“呛咳”信号时，救援模块便会迅速做出反馈，利用充气气囊对溺水者实施救援。产品设计图如图 12 所示，使用场景图如图 13 所示。



图 12 产品设计图
Fig.12 Product design drawing



图 13 产品使用场景
Fig.13 Product usage scenario

5 结 语

为满足溺水者的自主救援需求，通过对溺水者的行为及相关生理表象进行观察、实验与分析，将“呛咳”作为识别“溺水”的特征表象引入溺水自主救援产品设计中，提出了基于吞咽监测技术的溺水自主救援产品设计方法，不仅提高溺水者的自救成功率，也为水上救援产品设计提供了更多的思考方向和实践可能。主要的结论如下。

- 1) 针对溺水者因为“溺水”产生的多种生理表象，通过观察分析与实验筛选，确定“呛咳”作为唯一有效且能快速识别溺水的特征表象。
- 2) 通过水下环境中吞咽监测技术的可行性研究，

验证了该技术能够根据人体喉部发出的“呛咳”信号以判断溺水状态。

3) 将吞咽监测技术应用于溺水自救颈环设计中，当内置音频信号传感器监测到非正常“呛咳”时，内置气囊可自动充气并将溺水者头部托起于水面上方以实现救援。

本文缺乏对溺水自救颈环监测准确度与延迟性等方面的定量研究，尚需在后续进一步完善。

参考文献：

[1] 戴萌娜, 裘燕, 尹文强, 等. 中国 0~14 岁儿童 1990—2019 年溺水死亡现状及趋势分析[J]. 中国学校卫生, 2022, 43(2): 256-259.
DAI M N, XI Y, YIN W Q, et al. Current Situation and Trend of Drowning Deaths among 0—14 Year Old Children in China from 1990 to 2019[J]. Chinese School Health, 2022, 43(2): 256-259.

[2] 周敏, 姚敏, 郝冬梅, 等. 感觉统合训练结合吞咽康复干预对喉部分切除患者术后吞咽功能和生命质量的影响[J]. 河北医药, 2022, 44(6): 834-837.
ZHOU M, YAO M, HAO D M, et al. Effect of Sensory Integration Training Combined with Swallowing Rehabilitation Intervention on Swallowing Function and Quality of Life in Patients with Partial Laryngectomy[J]. Journal of Hebei Medicine, 2019, 44(6): 834-837.

[3] 强夕竹. 游泳池溺水报警及定位系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
QIANG X Z. Design and Implementation of Swimming Pool Drowning Alarm and Positioning System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.

[4] DEHBASHI F, AHMED N, MEHRA M, et al. Swim-Track: Drowning Detection using RFID[C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2019 Conference Posters and Demos. New York: ACM, 2019: 161-162.

[5] 符式培, 李吉振, 李致凯, 等. 基于游泳安全考虑的智能自救泳衣设计与研究[J]. 科技风, 2019(15): 1-15.
FU S P, LI J Z, LI Z K, et al. Design and Research of Intelligent Self-Rescue Swimsuit Based on Swimming Safety Consideration[J]. Science and Technology Wind, 2019(15): 1-15.

[6] ZHANG M L, CHEN Y S, LU X, et al. Fast Coding Unit Partition Decision for Intra Prediction in Versatile Video Coding[C]// Proceedings of the International Conference on Image and Graphics. Haikou: Springer, 2021: 700-711.

[7] 张钰新, 樊志鹏, 翟好宇, 等. 基于偏振成像的面部皮肤结构和特征非接触在体测量方法[J]. 中国激光, 2023, 50(3): 117-127.
ZHANG Y X, FAN Z P, ZHAI H Y, et al. Non-contact in Vivo Measurement of Facial Skin Structure and Features Based on Polarization Imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(3): 117-127.

[8] 李胜, 刘应焱, 王红英, 等. 2005—2019 年中国溺水死亡现状及趋势分析[J]. 现代预防医学, 2021, 48(15):

- 2705-2709.
- LI S, LIU Y Y, WANG H Y, et al. Analysis on the Status and Trend of Drowning Deaths in China from 2005 to 2019[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2019, 48(15): 2705-2709.
- [9] 汤卫雄, 程云章, 张天逸, 等. 基于脑电非线性特征和 AdaBoost 算法的诱导期麻醉深度检测[J]. *中国医学物理学杂志*, 2023, 40(5): 616-621.
- TANG W X, CHENG Y Z, ZHANG T Y, et al. Depth Detection of Anesthesia during Induction Based on EEG Nonlinear Characteristics and AdaBoost Algorithm[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2023, 40(5): 616-621.
- [10] 黄玲, 陈浩文, 张伟. 基于 Hausdorff 距离和变参数分进化的 SAR 图像配准[J]. *南京理工大学学报*, 2023, 47(3): 337-342.
- HUANG L, CHEN H W, ZHANG W. SAR Image Registration Based on Hausdorff Range and Variable Stagger Evolution[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 47(3): 337-342.
- [11] 高珊, 敖宏瑞. 压电振动能量收集器在穿戴设备上的应用[J]. *机械设计*, 2018, 35(增刊 1): 5-9.
- GAO S, AO H R. Application of Piezoelectric Vibration Energy Collector in Wearable Devices[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2018, 35(Sup.1): 5-9.
- [12] 周梦阳, 赫玉欣, 张丽, 等. 蚕丝基柔性导电复合材料在传感器中的应用进展[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(2): 30-34.
- ZHOU M Y, HE Y X, ZHANG L, et al. Application Progress of Silk Based Flexible Conductive Composites in Sensors[J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(2): 30-34.
- [13] 韩奉林, 费磊, 刘伟. 仿尺蠖软体机器人设计与制造[J]. *机械设计*, 2021, 38(9): 15-20.
- HAN F L, FEI L, LIU W. Design and Manufacture of Inchworm Imitation Software Robot[J]. *Journal of Machine Design*, 2021, 38(9): 15-20.
- [14] JOSEF V, KATRIN R. Validation of Easy Fabrication Methods for PDMS-based Microfluidic (Bio) Reactors[J]. *Sci*, 2022, 4(4): 36.
- [15] 谢为. 热塑性复合材料增材制造工艺与装备研究进展[J]. *航空材料学报*, 2023, 43(3): 1-11.
- XIE W. Research Progress of Additive Manufacturing Process and Equipment for Thermoplastic Composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(3): 1-11.
- [16] 佚名. 中国居民营养与慢性病状况报告(2020 年)[J]. *营养学报*, 2021, 42(6): 521.
- Anonymous. Report on Nutrition and Chronic Diseases of Chinese Residents(2020)[J]. *Chinese Journal of Nutrition*, 2021, 42(6): 521.
- [17] GAO S, ZHENG C, ZHAO Y, et al. Comparison of Enhancement Techniques Based on Neural Networks for Attenuated Voice Signal Captured by Flexible Vibration Sensors on Throats[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2022, 5(1): 5-15.

(上接第 22 页)

- [9] THOMPSON N, STEBBINS J, SENIOROU M, et al. Muscle Strength and Walking Ability in Diplegic Cerebral Palsy: Implications for Assessment and Management[J]. *Gait & Posture*, 2011, 33(3): 321-325.
- [10] 董尚胜, 陈艳娟, 黄小丽. 脑性瘫痪儿童骨质疏松相关指标调查研究[J]. *现代医药卫生*, 2022, 38(19): 3265-3269.
- DONG S S, CHEN Y J, HUANG X L. The Investigation on Related Indicators of Osteoporosis in Children with Cerebral Palsy[J]. *Journal of Modern Medicine & Health*, 2022, 38(19): 3265-3269.
- [11] PARKES J, WHITE-KONING M, DICKINSON H O, et al. Psychological Problems in Children with Cerebral Palsy: A Cross-Sectional European Study[J]. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 2008, 49(4): 405-413.
- [12] RUIZ BRUNNER M L M, CUESTAS E, HEINEN F, et al. Growth in Infants, Children and Adolescents with Unilateral and Bilateral Cerebral Palsy[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1879.
- [13] 杨爱慧, 王秋惠, 赵芳华, 等. 减重步行康复训练器人机工程设计[J]. *机械设计*, 2017, 34(4): 124-128.
- YANG A H, WANG Q H, ZHAO F H, et al. Ergonomics Design of Weight Loss Gait Rehabilitation Training Device[J]. *Journal of Machine Design*, 2017, 34(4): 124-128.
- [14] 赵川, 余隋怀, 初建杰, 等. 基于模糊逻辑的快速上肢评估方法(RULA)改进[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(7): 87-93.
- ZHAO C, YU S H, CHU J J, et al. Improvement of Rapid Upper Limb Assessment(RULA) Based on Fuzzy Logic[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(7): 87-93.
- [15] 彭茂军, 任金, 周显武, 等. 基于力学特性量化第五腰椎受力研究[J]. *中国新技术新产品*, 2021(2): 27-30.
- PENG M J, REN J, ZHOU X W, et al. Study on Quantifying the Force on the Fifth Lumbar Vertebra Based on Mechanical Properties[J]. *New Technology & New Products of China*, 2021(2): 27-30.
- [16] 丁玉兰. 人机工程学[M]. 5 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.
- DING Y L. Man Machine Engineering[M]. 5th ed. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2017.
- [17] 付晓莉, 赵云. 踏步康复训练器把手舒适性设计研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(10): 178-185.
- FU X L, ZHAO Y. Comfort Design of Stepping Rehabilitation Trainer Handle[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(10): 178-185.
- [18] 李剑, 李立峰, 李辉. 腋拐的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2014, 29(1): 93-98.
- LI J, LI L F, LI H. Biomechanical Study on Axillary Crutches[J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2014, 29(1): 93-98.
- [19] NADDEO A, CAPPETTI N, D'ORIA C. Proposal of a New Quantitative Method for Postural Comfort Evaluation[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2015, 48: 25-35.