

一种面向机械通气患者呼吸监测的无线传感器与系统设计^{*}

王筱涵 任 帅 王 涛

(北京理工大学自动化学院 北京 100081)

摘 要: 为了对机械通气患者实现精准的呼吸治疗,需要对患者吸、呼气体的状态参数进行实时监测。目前,患者吸、呼气体的状态参数主要通过呼吸机来测定,存在参数不足、回路漏气等问题,还会受到距离和障碍物的限制。针对上述问题,设计了一种可以同时监测吸呼气体温度、湿度、二氧化碳浓度、压力及流量这5类参数的无线传感器和系统,具有低功耗、体型小等特点,并可以实时把测量到的数据通过蓝牙进行低功耗无线传输到数据接收端,实现对机械通气患者呼吸状态的全面监测和远程监控评估,提高医疗设备的治疗效果。同时传感器无需外部供电,可以持续工作约60 d,覆盖绝大部分机械通气患者在ICU病房的全部时间并全程实施实时无线监测。

关键词: 机械通气;呼吸监测;低功耗蓝牙;呼吸参数

中图分类号: R318.6;TN925 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design of wireless sensor and system for respiratory monitoring of patients with mechanical ventilation

Wang Xiaohan Ren Shuai Wang Tao

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to achieve accurate respiratory treatment for patients with mechanical ventilation, it is necessary to monitor the status parameters of the patients' breathing and expiratory bodies in real time. At present, the state parameters of patients' breathing and expiratory bodies are mainly measured by respirators, which have problems such as insufficient parameters, circuit leakage, and are also limited by distance and obstacles. In view of the above problems, this paper designs a wireless sensor and system that can simultaneously monitor the temperature, humidity, carbon dioxide concentration, pressure and flow of breathing gas. It has the characteristics of low power consumption and small size, and can transmit the measured data to the data receiver in real time through the blue tooth for low power wireless transmission, so as to realize the comprehensive monitoring and remote monitoring and evaluation of the respiratory status of patients with mechanical ventilation, improve the therapeutic effect of medical equipment. At the same time, the sensor does not need external power supply, and can continue to work for about 60 days, covering the entire time of most patients with mechanical ventilation in the ICU and implementing real-time wireless monitoring throughout the whole process.

Keywords: mechanical ventilation; respiratory monitoring; BLE; respiratory parameters

0 引 言

机械通气是危重患者不可或缺的呼吸支持方式,是临床抢救治疗的重要手段之一,用于维持患者的呼吸功能,

为原发病治疗争取时间,对于提高抢救成功率具有重要作用^[1]。由于患者自主呼吸功能减弱、呼吸机应用阻滞纤毛运动等影响,需在机械通气治疗期间采取合理的呼吸治疗,以保证呼吸道通畅,减轻气管黏膜损伤、呼吸机相关肺炎等

收稿日期:2023-12-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52005015)项目资助

并发症^[2]。为了实现精准的呼吸治疗,需要对患者吸、呼气体的状态参数进行实时监测。呼吸参数的实时监测可以提供连续的相关参数监护信息,对患者的呼吸道状况监测并发出预警,便于患者病情的评估和治疗措施的调整^[3]。

目前,患者吸、呼气体的状态参数主要通过呼吸机来测定,主要监测呼吸气体的压力、流量,而对于温度、湿度、二氧化碳浓度等参数的测定往往依赖于外置附加模块^[4-7],这导致在机械通气过程中不能有效实时监测病人异常的气道状态,无法实现对患者的全面评估,影响医疗设备的治疗效果。同时,呼吸机的监测装置通常集成在呼吸机内部,但由于通气回路中不同导管和适配器的使用,常常会导致漏气^[8],使得供气流量、压力与实际到达患者的流量、压力有显著差异,且与远端监测相比,患者气道近端的呼吸监测通常可以更好地反映患者潜在的生理状况^[9]。此外,当前临床监护仪大多采用的是有线方式把数据传输到监测设备或计算机中进行分析,无疑增加了布置监护仪的困难^[10],不仅无法准确获取病人端的实际呼吸参数,还会受到距离和障碍物的限制,而且会增加设备的使用难度和成本。

近年来,随着物联网技术的进步,健康无线监测系统得到了广泛的研究和应用,这些监测系统可按使用场景分为家庭使用和医疗使用两类。在家庭监测系统的研究中,王金海等^[11]设计了一种基于“互联网+”的云健康监护系统,通过云平台实现对心电图、脉搏、血压、血氧饱和度、体温等生理参数的远程监控和管理。梁超等^[12]研发了可穿戴智能睡眠质量检测系统,通过采集睡眠中的翻转信息,评估睡眠质量。姜艳茹等^[13]设计了可穿戴式体温监测预警系统,通过实时监测体温变化,及时预警健康异常。戴凤智等^[14]提出了一种床垫式的睡眠监测与评估系统,通过综合分析心跳、呼吸、打鼾和体动等信号,对用户睡眠质量进行评估。

在临床监测领域,Ng等^[15]提出了一个CARE网络数据采集和监测系统(CARENet)来自动收集数据并远程监测患者特定的肺部状况和通气参数,该自动化系统使用数据采集设备从机械呼吸机获取呼吸机波形数据,将数据存储在网络附加存储器中,并通过数据管理平台web应用程序处理。张琥石等^[16]提出一种基于蓝牙的物联网多生理参数监测系统,使用HC-05蓝牙模块监测患者的体温、脉率、脉搏波数据,以便于医护人员监控、管理、统计病人的生理数据。Srinivasan等^[16]提出一种基于物联网的智能ICU患者监测系统,可连续监测患者的生理数据,如心跳、血压、呼吸频率,并提出采用人工智能框架监测患者是否出现异常情况。

然而,目前临床上的监测系统大多依赖于呼吸机的监测参数,部分系统虽致力于监测患者的生理参数,但尚未有系统能同时监测多类呼吸参数,如呼吸气体的温度、湿度、二氧化碳浓度等。此外,对于呼吸气体的监测大多采用远端监测的方式,这在一定程度上限制了对患者呼吸状

态的准确及全面评估。

针对上述问题,本文提出了一种低功耗便携式无线传感器,该传感器能够同时监测吸呼气体温度、湿度、二氧化碳浓度、压力及流量这5类呼吸参数,并实时通过低功耗蓝牙技术无线向外传输数据,工作全程无需外部供电,可以连续使用约60 d。基于此传感器,本文进一步构建了一种分布式架构的呼吸监测系统,该系统支持医护人员同时对多个患者进行同步监控和远程评估,有效提升了医疗设备的治疗效果和效率。

1 传感器硬件设计

1.1 电路设计

本文传感器的电路部分主要包括一个主控芯片以及4个检测芯片,分别是压力芯片、差压芯片、温湿度芯片和二氧化碳浓度芯片。

本文设计中主控芯片选用的是nRF52系列蓝牙芯片,它具有低功耗、高性能且支持多协议通信的优点,同时芯片高度集成,内置了多种外设和接口,以此可以实现主控芯片与检测芯片之间的通信,同时可以通过低功耗蓝牙向接收设备发送数据。差压芯片和压力芯片选用的是芯感智GZP68系列,支持I²C通信和3.3 V供电,且内部集成了高精度ADC芯片,可以对压力、差压芯片的偏移、灵敏度、温漂和非线性进行数字补偿。温湿度芯片和二氧化碳浓度芯片分别选用的是SHTC3和STC3系列,支持I²C通信,内部集成了信号处理和数字校准模块,且具有小型化的优点。

电路设计部分,主控芯片外部连接电感以实现DC/DC稳压器,DC/DC稳压器相较于默认的LDO稳压器具有更低的电流消耗。主控芯片与检测芯片的I²C通信是通过主控芯片的GPIO口与检测芯片的SCL/SDA引脚连接实现的,SCL串行时钟引脚是用于同步主控芯片和检测芯片之间的通信,SDA串行数据引脚是用于将数据传入和传出传感器,外部设有上拉电阻,保证SDA/SCL在空闲状态下保持高电平。同时检测芯片外接100 nF的电容,以实现电源引脚和电容的解耦。

最后生成的PCB三维图如图1所示。

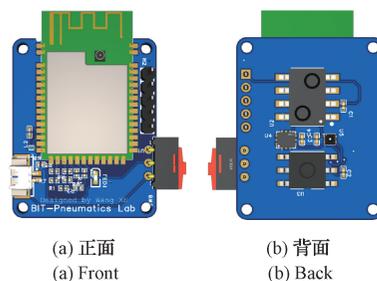


图1 PCB三维图

Fig. 1 3D view of PCB

1.2 外壳设计

传感器设计选用差压传感器测量流量信号,根据差压

传感器的测量原理,外壳设计选用文丘里管式,即通过改变差压芯片两个通气孔所在管道的横截面积大小,导致管道中的流体产生速度增大或减小,从而导致静压的变化,产生压力差。

根据质量守恒定律和伯努利方程,可以得出流量与差压的换算公式如下:

$$q = \frac{\pi}{4} c_d D_2^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho(1-d^4)}} \quad (1)$$

式中: D_1 、 D_2 分别表示差压芯片两个通气孔所处通气管道横截面积的直径, $d=D_2/D_1$; ρ 代表流体的密度; ΔP 表示两个横截面积的压力差,即差压信号; q 为流量; c_d 为流量系数,经差压流量实际标定后取得。

本文设计用于规定的标准呼吸回路接口,通过 22M/15F 的接口进行组合输入,通过 22F 接口进行输出。因此传感器的外壳设计选取 $D_1=15$ mm,选取 $D_2=10$ mm。

外壳结构设计是在 SolidWorks 中完成的,如图 2 所示。管道内设计 3 个通孔分别与差压芯片和压力芯片的 3 个检测探头进行配合,用于测量管道内气体流量和压力两参数。此外,管道内还设计有一个进气孔和出气孔,可以使管道内的气体通过进气孔和出气孔流经 PCB 板子的背面,进而实现二氧化碳浓度和温湿度 3 参数的测量。该外壳结构可与电路 PCB 板直接进行装配,如图 3 所示,内设计留有垫圈,以保证结构的密封性。其中 U 型结构是用来放置纽扣电池,实现结构具有小型化和便携性的特点,图 4 所示为传感器的实物装配图。

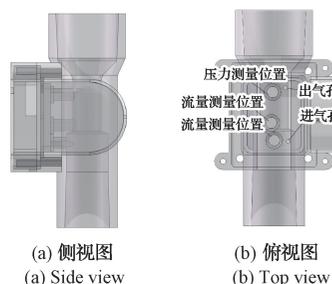


图 2 传感器外壳
Fig. 2 Sensor housing

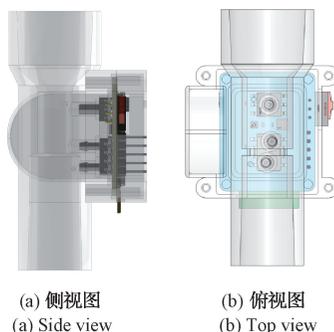


图 3 传感器装配图
Fig. 3 Sensor assembly diagram

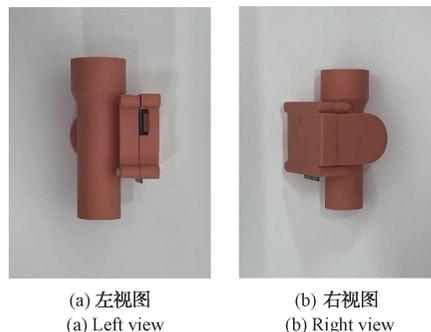


图 4 传感器实物
Fig. 4 Actual sensor

1.3 相关性能指标

通过实验标定后取式(1)中流量系数 $c_d=0.05$,正反向标定曲线如图 5 所示。

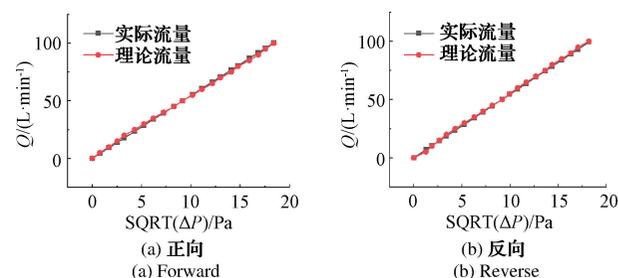


图 5 标定曲线
Fig. 5 Calibration curve

传感器相关参数的测量范围及精度如表 1 所示。

表 1 测量范围及精度
Table 1 Measurement range and accuracy

参数	测量范围	精度
压力	0~5 kPa	0.01
流量	0~100 L/min	0.01
温度	-20 °C~85 °C	1
湿度	0%~100%	1
CO ₂ 浓度	0%~25%	0.01

2 传感器软件设计

软件设计部分是在 Keil 上使用 C 语言编写,主要是实现差压芯片、压力芯片、温湿芯片、二氧化碳浓度芯片的数据采集,并将采集到的数据通过主控芯片的蓝牙向外传输,可以通过树莓派等数据接收装置进行数据接收。主要包括各个模块、协议栈的初始化;主控芯片与检测芯片之间的 I²C 通信;主控芯片蓝牙广播、服务的定制以及定时器等。

设计实现的是数据的定时采集与发送,通过调用 RTC 实时计数器,设定计时时间和回调函数实现数据的

定时采集和发送,使得检测芯片在空闲时处于待机或睡眠模式,进一步降低了整个传感器的功耗。设计中设定的差压芯片、压力芯片采集率为 10 次/s,温湿度芯片、二氧化碳浓度芯片采集率为 1 次/s。此外,nRF52 系列芯片内集成了 TWI 两线串行总线,通过 TWI 总线实现与检测芯片的 I²C 通信,并支持一主多从的连接方式。同时,nRF52 片内含有两个 TWIM 外设,考虑到差压芯片与压力芯片具有相同的地址,且二氧化碳浓度芯片采集数据时需要温湿度传感器采集的数据进行内部补偿浓度结果,因此将差压芯片、温湿度芯片和二氧化碳浓度芯片设计共用一个 TWIM 外设,压力芯片另用一个 TWIM 外设。

软件设计中蓝牙开发部分,主要实现蓝牙在未连接时发送广播,被连接时向数据接收器发送数据。其中主要包括了服务初始化模块,可以定义蓝牙发送的数据和格式;参数初始化模块,定义蓝牙设备名称、外观特征、连接参数等;连接参数协商模块,定义主设备和从设备连接参数协商次数或请求时间等;广播初始化模块,定义广播包含的内容;BLE 事件处理函数模块,判断蓝牙是否连接或超时;电源管理模块,实现低功耗蓝牙。程序流程如图 6 所示。

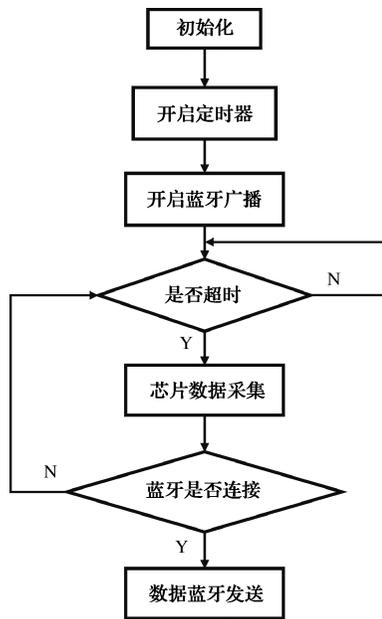


图 6 程序流程

Fig. 6 Program flowchart

3 传感器功耗计算

传感器设计选用低功耗蓝牙芯片,并通过稳压器的选择以及 RTC 实时计数器的调用、定时器的实现进一步降低了传感器的实际功耗。

传感器中设定的差压芯片/压力芯片采集率为 10 次/s,两芯片待机电流为 100 nA,采样电流为 5 μA,采样周期约为 110 ms,其中采样时间约为 10 ms。根据式(2)可得差压芯片/压力芯片采集率选定为 10 次/s 时平均电流约为

550 nA。

$$\bar{I} = I_s \times \frac{1}{11} + I_a \times \frac{1}{10} \quad (2)$$

式中: I_s 为采样电流; I_a 为待机电流。

传感器中设定的温湿度芯片/二氧化碳浓度芯片采集率为 1 次/s。温湿度芯片的睡眠电流为 600 nA,普通工作模式采样电流约为 900 μA,采样周期约为 1 010 ms,其中采样时间约为 10 ms,根据式(3)可得温湿度芯片采集率为 1 次/s 时平均电流约为 9.5 μA。

$$\bar{I} = I_s \times \frac{1}{101} + I_a \times \frac{100}{101} \quad (3)$$

式中: I_s 为采样电流; I_a 为睡眠电流。

二氧化碳浓度芯片空闲电流为 50 μA,睡眠电流为 1 μA,采样电流为 5 mA,采样周期约为 1 078 ms,其中采样时间约为 66 ms,空闲时间约为 12 ms,根据式(4)可得二氧化碳浓度芯片采集率为 1 次/s 时平均电流约为 307 μA。

$$\bar{I} = I_s \times \frac{66}{1\ 078} + I_i \times \frac{12}{1\ 078} + I_a \times \frac{1\ 000}{1\ 078} \quad (4)$$

式中: I_s 为采样电流; I_i 为空闲电流; I_a 为睡眠电流。

4 个采样芯片所需平均电流约为 0.32 mA,低功耗主控芯片工作的平均电流约为 0.4 mA,传感器总功耗约为 0.7 mA。选用 1 000 mAh 的电池,可以支持传感器连续使用工作约 60 d。

4 呼吸监测系统

现依赖本文设计的无线传感器提出一种分布式架构的呼吸监测系统,将无线传感器接在患者近端的呼吸管道上进行压力、流量、温湿度和二氧化碳浓度 5 种呼吸参数的数据的采集,并实时将采集到的数据通过蓝牙向数据终端进行传输,数据终端可以同时接收多个蓝牙的数据并进行数据处理,最后由数据终端将处理过的数据上传到云端,通过对从云端获取的大量监测数据进行分析,可以发现潜在的规律和趋势,并为临床医生提供个性化的治疗建议。同时可以依据云端数据建立预测模型,实现对呼吸异常、潜在的呼吸问题等进行预测,并及时发出警报,以提醒医护人员采取相应的干预措施。以此可以实现对机械通气患者呼吸状态的全面监测和远程监控评估,呼吸监测系统示意图如图 7 所示。

在机械通气的实际应用中有无创监测和有创监测两种情况,其中无创测量有两种使用方式,一种为口鼻罩式另一种为鼻罩式。以口鼻罩式为例,该方式监测时传感器的连接方式如图 8 所示。

5 系统测试

为了验证传感器在测量各项呼吸参数时的准确性,设计将传感器分别接入不同的测试回路进行实验,并选取了公认的标准设备作为参照。

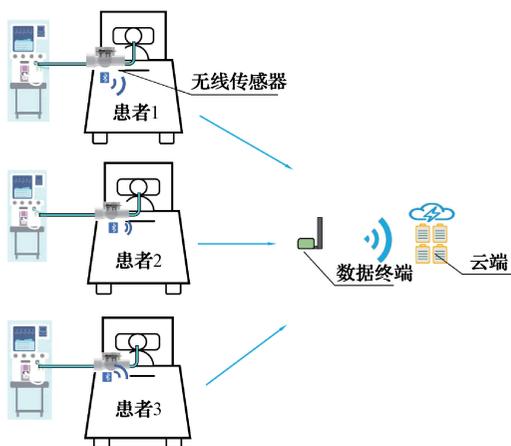


图7 呼吸监测系统示意图

Fig. 7 Respiratory monitoring system schematic



图8 实验模拟图

Fig. 8 Experimental simulation diagram

首先,将传感器连接至 T-30TH 呼吸机(ResMed, 澳

大利亚)的通气管路,以模拟实际呼吸过程中的通气情况,并将数据终端接收到的数据与 T-30TH 呼吸机的通气压力曲线进行对比。通过多次调整呼吸机的吸气压力和呼气压力设定值,比较传感器测量结果与呼吸机压力设定值的一致性,结果总结如表 2 所示。

表 2 T-30TH 呼吸机与系统测量结果比较

Table 2 Comparison of measurement results between T-30TH ventilator and the system (cm·H₂O)

吸气压力		呼气压力	
本文传感器	T-30TH 呼吸机	本文传感器	T-30TH 呼吸机
15.15	15.0	3.97	4.0
20.35	20.0	8.15	8.0
25.30	25.0	12.20	12.0
29.96	30.0	16.26	16.0

其次,为了评估传感器测量温湿度及二氧化碳浓度的准确性,实验分别选用了 AirNow 气体检测仪(AIRNOW, 中国)和呼末二氧化碳浓度检测仪(BRAINER, 中国)作为参照设备,测量人体正常呼吸下的相关气体参数。通过比较本传感器与这两台设备的测量结果来评估传感器的性能,实验结果如表 3 所示。

最后,为验证传感器测量的流量精度,实验选用 SFC5500 流量控制器(SENSIRION, 瑞士)作为标准设备,对输入气体进行精确的流量控制,以比较在不同流量设定值下,传感器测量值与流量设定值之间的差异,结果总结如表 4 所示。

表 3 气体检测仪与系统测量结果比较

Table 3 Comparison of measurement results between gas detectors and the system

温度/°C		湿度/%RH		CO ₂ 浓度/%	
本文传感器	AirNow 气体检测仪	本文传感器	AirNow 气体检测仪	本文传感器	呼末 CO ₂ 浓度检测仪
25	25.5	64	65.8	3.6	3.56
26	26.4	78	78.6	3.4	3.42
27	27.7	85	86.1	3.3	3.29
27	27.5	87	87.5	3.2	3.16
27	27.7	90	89.6	3.1	3.16

表 4 SFC5500 质量流量控制器与系统测量结果比较

Table 4 Comparison of measurement results between SFC5500 mass flow controller and the system

传感器	流量/(L·min ⁻¹)																			
本文	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
SFC5500	9.01	18.3	28.9	39.0	50.4	59.6	69.5	79.6	89.4	99.3	108.6	117.9	127.3	138.1	146.4	158.1	168.8	179.7	188.1	197.3

根据实验测量结果,分别计算本系统所测各个参数的误差,总结如表 5 所示。结果显示,本文系统各个参数的监测误差均在 3%以内,符合医学上对患者呼吸监测的高

精度和准确度要求。从临床角度分析,这些微小的误差对于常规的临床操作和病情监控通常不会产生显著的负面影响。

表5 系统误差
Table 5 System errors

监测参数	误差/%
压力	1.3
流量	2.1
温度	2.1
湿度	1.2
CO ₂ 浓度	1.0

6 结论

本文设计了一种面向机械通气患者呼吸监测的多参数无线传感器和系统。

1)采用近端监测多参数集成,采用近患者端测量,较于传统呼吸机监测可以更好地反映患者潜在的生理状况。能同时监测呼吸气体5类参数,误差稳定在3%以内,克服了传统系统只能测定部分参数的限制,有助于更全面评估病情。

2)低功耗无线传输,该系统无需外部电源,通过低功耗设计实现ICU连续60d使用,基本覆盖病人住院时间。同时无线传输方式克服了传统数据传输距离和障碍物的限制,增加了设备使用的便捷性,可以实现患者的远程管理。

3)患者病况智能感知,当前ICU患者病况主要通过医护人员根据患者体征信息进行判断,严重依赖经验。本文系统基于传感器采集的数据,构建预测模型,自动实现患者病况的准确感知。

参考文献

- [1] 孙娜,孙英明,刘学惠,等. ICU机械通气病人人机异步研究进展[J]. 护理研究, 2021,35(8):1457-1460.
SUN N, SUN Y M, LIU X H, et al. Research progress on patient-ventilator asynchrony in ICU mechanically ventilated patients [J]. Nursing Research, 2021, 35(8):1457-1460.
- [2] 孙斐. 吸痰体位对颅脑损伤行气管切开患者吸痰效果的影响[J]. 齐鲁护理杂志, 2020,26(4):34-37.
SUN F. Effect of suction position on sputum suction in patients with craniocerebral injury undergoing tracheotomy [J]. Journal of Qilu Nursing, 2020, 26(4):34-37.
- [3] 董亦晗, 刘鹏, 刘石, 等. 儿童阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征患者睡眠呼吸监测分析[J]. 中国伤残医学, 2013,21(5):263-264.
DONG Y H, LIU P, LIU SH, et al. Sleep respiratory monitoring analysis of children with obstructive sleep apnea hypopnea syndrome [J]. Chinese Journal of Trauma and Disability Medicine, 2013, 21(5): 263-264.
- [4] 陈旭创, 龙碧连, 潘远文, 等. 呼吸机管路温湿度监测控制系统[J]. 医疗装备, 2020,33(5):3-6.
CHEN X CH, LONG B L, PAN Y W, et al. Temperature and humidity monitoring control system for ventilator pipelines[J]. Medical Equipment, 2020, 33(5):3-6.
- [5] 沈谦益, 文戈弋, 宗力群. 呼气末CO₂分压监测的临床应用及相关设备研究进展[J]. 医疗卫生装备, 2021,42(2):60-65.
SHEN Q Y, WEN G Y, ZONG L Q. Clinical application of end-tidal CO₂ partial pressure monitoring and research progress of related equipment [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2021, 42(2):60-65.
- [6] 周学良, 刘鹏, 于志鹏, 等. 浅谈新冠疫情下我国呼吸机发展现状[J]. 中国仪器仪表, 2021(8): 27-32.
ZHOU X L, LIU P, YU ZH P, et al. A brief discussion on the development status of ventilators in China under the COVID-19 epidemic [J]. China Instrumentation, 2021(8):27-32.
- [7] SINGH P O, HOWE A T, MALARVILI M. Real-time human respiration carbon dioxide measurement device for cardiorespiratory assessment[J]. Journal of Breath Research, 2018, 12(2):026003.
- [8] 徐伟然. 医院呼吸机常见故障诊断与保养技术[J]. 中国城乡企业卫生, 2023,38(9):215-217.
XU W R. Common fault diagnosis and maintenance technology of hospital ventilators[J]. Chinese Journal of Urban and Rural Industrial Hygiene, 2023, 38(9): 215-217.
- [9] JAFFE M B, ORR J. Continuous monitoring of respiratory flow and CO₂ [J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2010,29(2):44-52.
- [10] 张晓石, 林伟龙, 黄向军, 等. 基于蓝牙的物联网多生理参数监测系统[J]. 物联网技术, 2021,11(3):10-13.
ZHANG H SH, LIN W L, HUANG X J, et al. Multi-physiological parameter monitoring system based on Bluetooth IoT[J]. Internet of Things Technologies, 2021,11(3):10-13.
- [11] 王金海, 国海丁, 王慧泉, 等. 互联网+下的云健康监护系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2016,37(S1):88-93.
WANG J H, GUO H D, WANG H Q, et al. Design of cloud health monitoring system under Internet+[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(S1):88-93.
- [12] 梁超, 王鹏, 曹贝贝, 等. 可穿戴智能睡眠质量检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(5): 159-167.

- LIANG CH, WANG P, CAO B B, et al. Wearable intelligent sleep quality detection system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(5):159-167.
- [13] 姜艳茹, 孟令军. 可穿戴式体温监测预警系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(7):149-153.
- JIANG Y R, MENG L J. Design of wearable body temperature monitoring and early warning system[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(7): 149-153.
- [14] 戴凤智, 芦鹏, 朱宇璇. 基于多传感器的睡眠监测与评估系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(4): 126-133.
- DAI F ZH, LU P, ZHU Y X. Design of sleep monitoring and evaluation system based on multi-sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(4): 126-133.
- [15] NG Q A, CHIEW Y S, WANG X, et al. Network data acquisition and monitoring system for intensive care mechanical ventilation treatment [J]. IEEE Access, 2021, 9:91859-91873.
- [16] SRINIVASAN C, VARSHA R, KONIREDDY S, et al. SIPMS: IoT based smart ICU patient monitoring system [C]. 2023 International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Discovery in Concurrent Engineering (ICECONF), 2023:1-7.

作者简介

王筱涵, 硕士研究生, 主要研究方向为智能感知与运动控制。

E-mail: wangxiachan@bit.edu.cn

任帅(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为气动检测与控制、流体传动与医学的交叉。

E-mail: renshuai@bit.edu.cn